



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **JÄTTEENPOLTON POHJAKUONAN HYÖDYNTÄMINEN MAARAKENTAMISESSA**

Nina Keränen

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Diplomityö

Heinäkuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Jätteenpolton pohjakuonan hyödyntäminen maarakentamisessa

Nina Keränen

Oulun yliopisto, ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2021, 79 s. + 14 liitettä

Työn ohjaajat yliopistolla: Mirja Illikainen, Anne Tuomela ja Priyadharshini Perumal

Yhdyskuntajätteen poltossa syntyy pohjakuonaa, jonka hyödyntämismahdollisuuksia on pyritty tutkimaan laajalti. Tässä työssä tutkittiin Fortum Waste Solutions Oy:n käsittelemää pohjakuonaa ja sen soveltuvuutta sideaineeksi kantavaan kerrokseen. Tutkittavaa pohjakuonaa oli kahdessa eri raekokoluokassa, 0–1,7 mm ja 1,7–13 mm. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena sekä laboratoriokokeina.

Kirjallisuuskatsauksessa käytiin läpi pohjakuonien syntyminen sekä niiden yleiset ominaisuudet. Työssä selvitettiin myös kuonien lujittumisominaisuuksia sekä itsekseen että erilaisten aktivaattorien kanssa. Lisäksi selvitettiin kuonien käsittely- ja hyödyntämismahdollisuuksia.

Kokeellisessa osuudessa tutkittiin saadun pohjakuonan perusominaisuudet sekä lujuusominaisuuksia eri sideaineiden (kalsiumhydroksidi ja sementti) kanssa. Molemmista kuonajakeista tutkittiin partikkelikokojakauma, tiheys, hehkutushäviö, kemiallinen ja mineraloginen koostumus, liukoisuusominaisuudet sekä tehtiin termogravimetrinen analyysi. Lisäksi molemmille jakeille tehtiin puristuslujuuskokeet 10 %:n sementin ja kalsiumhydroksidin lisäyksellä. Näiden tulosten perusteella todettiin, että hieno (0–1,7 mm) pohjakuona on potentiaalisempi materiaali käytettäväksi sideaineena.

Hienolle pohjakuonalle suoritettiin lisäkokeita eri sideainemäärillä. Valmistetuille koekappaleille suoritettiin puristuslujuusmittauksia, laskettiin absorptioarvot sekä mitattiin kemiallinen ja mineraloginen koostumus että liukoisuusarvot. Tutkimusten perusteella koekappaleet eivät saavuttaneet haluttuja lujuusominaisuuksia, joten tutkittava kuona ei sovellu sellaisenaan käytettäväksi sideaineena kantavan kerroksen

lujittamisessa. Yhtenä syynä toimimattomuudelle voi olla korkea orgaanisen aineen määrä, johon korkea hehkutushäviö ja liunneen orgaanisen hiilen määrä viittaavat. Orgaanisen aineksen määrä voitaisiin vielä varmistaa TOC-analyysin avulla.

Kuonan ominaisuuksia voisi mahdollisesti parantaa kehittämällä poltto- tai käsittelyprosessia. Vaikka tutkittava kuona ei soveltunut sideaineeksi, alkuperäinen hienontamaton jae voisi mahdollisesti soveltua muuhun käyttöön, esimerkiksi korvaamaan luonnonkiviainesta tien jakaviin kerroksiin. Koska pohjakuonien ominaisuudet vaihtelevat jätteenpolttolaitoksen mukaan, tämän työn tuloksia ei voi yleistää koskemaan kaikkia jätteenpolttolaitosten kuonia.

*Asiasanat: kiertotalous, maarakentaminen, jätteenpolton pohjakuona, jätteiden hyötykäyttö*

# ABSTRACT

Utilization of municipal solid waste incineration bottom ash in civil engineering

Nina Keränen

University of Oulu, Degree Programme of Environmental Engineering

Master's thesis 2021, 79 pp. + 14 Appendixes

Supervisors at the university: Mirja Illikainen, Anne Tuomela and Priyadharshini Perumal

The incineration of municipal solid waste generates bottom ash which utilization has been widely studied. In this thesis, the suitability of bottom ash as binder in road base was investigated. The material used in this study was provided by Fortum Waste Solutions Oy. Studied bottom ash was in two fractions: 0-1,7 mm and 1,7-13 mm. Thesis was carried out as literature review and laboratory experiments.

The literature review examined the generation of bottom ash and its general characteristics. The work also investigated the self-hardening properties of bottom ash and hardening with different activators. In addition, the possibilities of bottom ash treatment and utilization were studied.

In laboratory experiments, general characteristics of the obtained bottom ash as well as hardening properties with different binders (calcium hydroxide and cement) were studied. Both fractions were examined for particle size distribution, density, loss on ignition, chemical composition, mineralogy, leaching, and thermogravimetric analysis. In addition, both fractions were subjected to compressive strength tests with the addition of 10 % cement or calcium hydroxide. Based on these results, it was seen that fine fraction (0-1,7 mm) had more potential to work as a binder, and therefore further investigations were made for this material.

For fine fraction, more tests were made with the addition of different binder contents. Compressive strength measurements were performed on the prepared test specimens, absorption values were calculated and chemical and mineralogical composition as well as leaching values were measured. Based on the studies, the test specimens did not

achieve the desired strength properties, so the studied bottom ash is not suitable to use as a binder in road base. One reason for failure may be the high amount of organic matter indicated by the high loss on ignition and the amount of dissolved organic carbon. The amount of organic matter could still be confirmed by TOC analysis.

The properties of the bottom ash could potentially be improved by developing the incineration or treatment process. Although the bottom ash was not suitable as a binder, the original, non-milled fraction could potentially be suitable for other uses, such as replacing natural aggregates in sub-base. Because the properties of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash vary depending on the incinerator, the results of this thesis cannot be generalized to other MSWI bottoms ashes.

*Keywords: circular economy, civil engineering, municipal solid waste incineration bottom ash, waste utilization*

# ALKUSANAT

Tämän diplomityön tarkoituksena oli selvittää jätteenpolton pohjakuonan soveltuvuutta sideaineeksi tierakenteen kantavaan kerrokseen. Työ suoritettiin tammi-kesäkuun 2021 aikana osana Oulun yliopiston kuitu- ja partikkelitekniikan tutkimusyksikön MIMEPRO hanketta ja yhteistyössä Fortum Waste Solutions Oy:n kanssa. Työn ohjaajina toimivat Oulun yliopistolta tekniikan tohtori Mirja Illikainen, diplomi-insinööri Anne Tuomela ja tekniikan tohtori Priyadharshini Perumal.

Erittäin suuret kiitokset työni ohjaajille antamastanne ohjauksesta ja kommentteista. Kiitos myös kuitu- ja partikkelitekniikan yksikölle mielenkiintoisesta aiheesta ja Fortum Waste Solutions Oy:lle toimittamastanne materiaalista. Lisäksi haluan kiittää kuitu- ja partikkelitekniikan tutkimusyksikön ja materiaalianalyysikeskuksen henkilökuntaa kaikesta avusta ja neuvoista kokeellisen osuuden aikana.

Lisäksi haluan kiittää perhettäni antamastanne tuesta työn ja koko opintojeni aikana. Kiitokset myös kaikille ystäväilleni unohtumattomista hetkistä opintojen aikana. Erityiset kiitokset Julialle ja Victorialle vertaistuesta ja kannustuksesta tämän kirjoitusprosessin aikana.

Oulussa, 30.06.2021

*Nina Keränen*

Nina Keränen

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 Johdanto .....	10
1.1 Tausta .....	10
1.2 Työn tavoitteet ja tutkimuskysymykset .....	10
1.3 Rakenne, toteuttamistapa ja menetelmät.....	11
2 Jätteenpolton pohjakuonat.....	12
2.1 Kuonan muodostuminen .....	12
2.2 Kuonan ominaisuudet.....	13
2.2.1 Fysikaaliset ominaisuudet.....	13
2.2.2 Kemiallinen koostumus ja emäksisyys.....	15
2.2.3 Mineralogia.....	16
2.2.4 Liukoisuusominaisuudet .....	16
2.2.5 Ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät .....	18
2.3 Kuonien käsittely .....	19
2.3.1 Kemialliset menetelmät .....	19
2.3.2 Fysikaaliset menetelmät.....	20
2.3.3 Termiset menetelmät .....	21
2.3.4 Kuonan käsittelyprosessit .....	22
3 Pohjakuonan käyttömahdollisuudet .....	27
3.1 Pohjakuona sementin, betonin ja kevyen runkoaineen raaka-aineena .....	27
3.2 Pohjakuona lasin raaka-aineena ja kasvualustana.....	29
3.3 Ohjeet pohjakuonan hyödyntämiseksi maarakentamisessa .....	29
3.3.1 Pohjakuonan hyödyntäminen tierakenteiden jakavassa kerroksessa.....	30
3.3.2 Pohjakuonan hyödyntäminen tierakenteiden kantavassa kerroksessa.....	32
3.3.3 Pohjakuonan hyödyntäminen sideaineena tierakenteissa .....	33
4 Kuonan lujittumisominaisuudet .....	35
4.1 Sementin hydrataatio.....	35
4.2 Lujittuminen itsestään .....	36
4.3 Sementin seosaineena.....	36

4.4 Alkaliaktivoitua materiaalia	37
4.5 Lujittumiseen vaikuttavat ominaisuudet	38
5 Tutkittava kuona ja tutkimusmenetelmät	39
5.1 Tutkittavat pohjakuonat	39
5.2 Kuonien valmistelu	39
5.3 Kuonan ominaisuuksien määrittely	40
5.3.1 Partikkelikokojakauma	40
5.3.2 Tiheys ja hehkutushäviö	40
5.3.3 Kemiallinen koostumus	41
5.3.4 Mineraloginen koostumus	41
5.3.5 Termogravimetrinen analyysi	41
5.3.6 Liukoisuusominaisuudet	43
5.4 Koekappaleetutkimukset	43
5.4.1 Puristuslujuus	44
5.4.2 Veden imeytyminen	45
5.4.3 Mineraloginen koostumus ja liukoisuusominaisuudet	46
6 Tulokset ja niiden analysointi	47
6.1 Kuonien ominaisuudet	47
6.1.1 Partikkelikokojakauma	47
6.1.2 Tiheys ja hehkutushäviö	48
6.1.3 Kemiallinen koostumus	48
6.1.4 Mineraloginen koostumus	50
6.1.5 Termogravimetrinen analyysi	51
6.2 Koekappaleiden ominaisuudet	54
6.2.1 Puristuslujuus	54
6.2.2 Veden imeytyminen	57
6.2.3 Mineraloginen koostumus	59
6.2.4 Liukoisuusominaisuudet	60
6.3 Tulosten yhteenveto	61
7 Johtopäätökset ja suositukset	64
8 Yhteenveto	66

## LÄHDELUETTELO

### LIITTEET:

Liite 1. XRD-analyysin mittaussparametrit.

Liite 2. Jauhetun karkean ja hienon pohjakuonan partikkelikokojakauma.

Liite 3. Karkean ja hienon pohjakuonan tiheys.



Liite 4. Karkean ja hienon pohjakuonan kemiallinen koostumus.

Liite 5. XRD-tulokset paljaalle hienolle pohjakuonalle.

Liite 6. XRD-tulokset paljaalle karkealle pohjakuonalle.

Liite 7. TGA-laskuissa käytetyt data-arvot.

Liite 8. Näytteiden TGA-kuvaajat.

Liite 9. Toisen vaiheen koekappaleiden märkä- ja kuivapainot sekä absorptiotulokset.

Liite 10. XRD-tulokset koekappaleelle 2 %  $\text{Ca(OH)}_2$  lisäyksellä.

Liite 11. XRD-tulokset koekappaleelle 6 %  $\text{Ca(OH)}_2$  lisäyksellä.

Liite 12. XRD-tulokset koekappaleelle 10 %  $\text{Ca(OH)}_2$  lisäyksellä.

Liite 13. XRD-tulokset koekappaleelle 6 % sementin lisäyksellä.

Liite 14. XRD-tulokset koekappaleelle 10 % sementin lisäyksellä.

## MERKINNÄT JA LYHENTEET

C-S-H	kalsiumsilikaattihydraatti
LOI	hehkutushäviö (loss on ignition)
MARA	Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa
MPa	Megapascal
M	moolimassa
m	massa
n	ainemäärä
N-A-S-H	natriumaluminosilikaattihydraatti
TGA	termogravimetrisen analyysi
XRD	röntgendiffraktio
XRF	röntgenfluorenssi

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Tausta

Maailman väkiluvun ja talouden kasvaessa myös syntyneen jätteen määrä kasvaa jatkuvasti. Jätteenpolttolaitoksissa jätteet saadaan hyödynnettyä energiana ja jätteen massa ja tilavuus pienenevät merkittävästi. Jäljelle jäävät kuonat ja tuhkat tulee kuitenkin hävittää kaatopaikalle tai käyttää hyödyksi. (Hjelmar 1994) Jätteenpolton pohjakuona on potentiaalinen materiaali hyödynnettäväksi kiertotaloudessa, sillä se sisältää vähemmän haitta-aineita kuin esimerkiksi jätteenpoltossa syntyvä lentotuhka (Shim ym. 2003). Aikaisemmissa tutkimuksissa on käsitelty muun muassa pohjakuonan hyödyntämistä maarakentamisessa (Arm ym. 2008; Bendz ym. 2006; Harju ym. 2019) sekä sementti- ja betonituotteissa luonnonkiviaineksen korvikkeena (An ym. 2014; Keulen ym. 2016; Pan ym. 2008). Pohjakuonan soveltuvuutta sideaineeksi on myös tutkittu jonkin verran (Caprai ym. 2019; Maldonado-Alameda ym. 2020a), mutta soveltuvuutta sideaineeksi tierakenteen kantavaan kerrokseen ei ole juurikaan tutkittu.

Suomessa yhdyskuntajätettä syntyy vuosittain yli kolme miljoonaa tonnia ja tästä reilu 50 % hyödynnetään energiana (Suomen virallinen tilasto 2020). Näin ollen myös kuonia syntyy merkittäviä määriä. Suomessa kuonaa on jo hyödynnetty esimerkiksi tierakenteissa, ja hyödyntämistä on pyritty helpottamaan muun muassa MARA-asetuksen avulla. Koska pohjakuonien ominaisuudet riippuvat muun muassa polttolaitoksen käyttämästä tekniikasta (Kaartinen ym. 2010, s. 22), täytyy kuonien ominaisuudet tutkia ennen niiden hyödyntämistä.

## 1.2 Työn tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Tämän työn tavoitteena oli selvittää, voidaanko Fortum Waste Solutions Oy:n toimittamaa pohjakuonaa hyödyntää sideaineena tierakenteen kantavassa kerroksessa. Työ suoritettiin kirjallisuuskatsauksen ja laboratoriokokeiden avulla. Koska pohjakuona sisältää samoja kemiallisia yhdisteitä kuin portlandsementti, odotuksena oli, että kuona voisi soveltua sideainekäyttöön.

Diplomityön tutkimuskysymykset olivat:

1. Mitä ominaisuuksia jätteenpolton pohjakuonalla yleisesti on, sekä miten kuonia voidaan käsitellä ja hyödyntää?
2. Mitä ominaisuuksia sideaineena toimivalta materiaalilta vaaditaan?
3. Millaisia ominaisuuksia tutkittavalla pohjakuonalla on, ja täyttääkö se sideaineen vaatimukset?

Kahteen ensimmäiseen kysymykseen saatiin vastaus kirjallisuusosion avulla. Kolmanteen kysymykseen saatiin vastaus suorittamalla laboratoriokokeita tutkittavalle kuonalle.

### **1.3 Rakenne, toteuttamistapa ja menetelmät**

Työssä esitettiin ensin kirjallisuusosio, jossa käytiin läpi pohjakuonien tyypilliset ominaisuudet kuten partikkelikoko, kemiallinen ja mineraloginen koostumus sekä liukoisuusominaisuudet. Tämän jälkeen tutkittiin, miten pohjakuonia voidaan käsitellä ja käytiin läpi muutamia esimerkkejä mahdollisista käsittelyprosesseista. Tämän jälkeen esiteltiin pohjakuonan mahdollisia hyödyntämiskohteita, sekä mitä ominaisuuksia vaaditaan tierakenteessa käytettävältä sideaineelta.

Kokeellisessa osuudessa tutkittiin ensin molempien tutkittavien pohjakuonajakeiden perusominaisuudet, kuten partikkelikoko, tiheys, kemiallinen ja mineraloginen koostumus ja liukoisuusominaisuudet. Sen lisäksi tehtiin koekappaletutkimuksia, joiden avulla määriteltiin kumpi jae toimisi mahdollisesti paremmin. Valitulle jakeelle tehtiin vielä lisää lujuuskokeita eri sideainemäärän lisäyksillä sekä tutkittiin koekappaleiden liukoisuusominaisuudet sekä mineraloginen koostumus. Lopuksi esitettiin kokeista saadut tulokset sekä niiden pohjalta tehdyt johtopäätökset ja suositukset.

## 2 JÄTTEENPOLTON POHJAKUONAT

Suomessa tuotettiin vuonna 2019 yli kolme miljoonaa tonnia yhdyskuntajätettä. Vuodesta 2012 alkaen jätteiden energiahyödyntäminen on ollut merkittävin yhdyskuntajätteen käsittelymuoto ja vuonna 2019 56 % yhdyskuntajätteestä hyödynnettiin energiana. (Suomen virallinen tilasto 2020) Suomessa on käytössä kymmenen jätevoimalaitosta (KIVO 2021). Jätteiden polttoprosessissa muodostuu jakeina pohjakuonaa, kattila- ja lentotuhkaa sekä savukaasujen puhdistuksen reaktiotuotteita (Pöyry Management Consulting Oy 2015).

### 2.1 Kuonan muodostuminen

Arinapoltto on yleisin polttotekniikka ja Suomessa se on käytössä kahdeksalla jätevoimalaitoksella. Vain kaksi voimalaitosta käyttää erilaista tekniikkaa; Lahti Energia Oy:n Kymijärvi II -voimalaitos käyttää kaasutuspolttotekniikkaa ja Riikinvoima Oy:n Riikinvoiman Ekovoimalaitos käyttää kiertopetiteknikkaa (Lahti Energia Oy 2021; Riikinvoima Oy 2021). Tässä työssä käydään läpi vain arinapoltto, sillä tutkittava materiaali on peräisin arinapolttolaitokselta.

Arinapoltossa jäte syötetään syöttösuppilon ja hydraulisten työntimien avulla tulipesään, jossa jätteen palaminen tapahtuu neljällä eri alueella; kuivumis-, pyrolyysi- ja kaasuuntumisvyöhykkeellä sekä lopuksi hiiltojäännöksen palamisalueella. Tulipesä pyritään suunnittelemaan siten, että eri vyöhykkeiden kaasut sekoittuvat keskenään mahdollisimman hyvin. Jätteen sekoittuminen arinassa saadaan aikaan liikkuvien pintakappaleiden, värinän, pyörivien rullien tai mekaanisten sekoittimien avulla. Karkea kuona ja palamattomat materiaalit poistuvat arinan alaosaan pohjatuhkajärjestelmään. (Vesanto 2006) Pohjakuona voidaan poistaa polttoprosessista märällä tai kuivalla menetelmällä. Märkä menetelmä on yleisin ja siinä kuuma pohjakuona jäähdytetään vedellä. (Šyc ym. 2018) Savukaasut johdetaan yleensä esijäähdytyskammion kautta lämmöntalteenottokattilaan, jonka jälkeen ne johdetaan puhdistusprosessiin. Arinapolton etuna on sen soveltuvuus monenlaisen jätteen polttoon sekä se, että esikäsittelyksi riittää suurien kappaleiden rikkominen ja suurten metalliesineiden poistaminen. Prosessi myös kestää melko hyvin jätteen kosteuden, lämpöarvon ja tuhkapitoisuuden vaihtelua. (Vesanto 2006)

## 2.2 Kuonan ominaisuudet

Pohjakuona muodostuu yleisemmin arinalle jääneestä palamattomasta ja sulaneesta aineesta sekä arinan aukkojen läpi pudonneesta materiaalista (Chandler ym. 1997, s. 90 ja 92). Jätteenpolttolaitokset tuottavat tyypillisesti 200–350 kg kuonaa poltettua jätetonna kohden, joka on noin 85–95 % kaikista polton aikana syntyneistä jäännöksistä. Syntyneiden kuonien ominaisuudet vaihtelevat jätteen laadun, polttotekniikan ja -parametrien sekä polttoaineen mukaan. (Chandler ym. 1997, s. 339; Kaartinen ym. 2010) Kuonan fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet ovat tärkeää ymmärtää, jotta kuona voidaan saada onnistuneesti hyötykäyttöön. (Wiles ja Shepherd, 1999, s. 6).

### 2.2.1 Fysikaaliset ominaisuudet

Pohjakuonan keskeisimmät fysikaaliset ominaisuudet ovat partikkelikokojakauma, vesipitoisuus, absorptio, tiheys sekä morfologia. Pohjakuonasta jopa 20 % on partikkelikooltaan yli 10 cm. Alle 10 cm jae luokitellaan suhteistuneeksi, eli hienoa ja karkeaa materiaalia on yhtä paljon. (Chandler ym. 1997, s. 357; Wiles 1996) Partikkelikokojakauma on tärkeä ominaisuus, sillä sen avulla voidaan arvioida myös muita ominaisuuksia, kuten leikkauslujuutta, kantavuutta sekä vedenläpäisevyyttä (Chandler ym. 1997, s. 205). On myös havaittu, että kuonan koostumus on jossain määrin riippuvainen partikkelikoosta. Karkein jae sisältää rakennusjätettä, rautapitoisia materiaaleja, kuonapartikkeleja sekä palamatonta jätettä. Lasipartikkelit ovat yleisimpiä 5-16 mm jakeessa ja hienojakeen pääkomponentti on kuonapartikkelit. (Izquierdo ym. 2001) Hienoainemäärä on tärkeä ottaa huomioon, kun harkitaan pohjakuonan hyödyntämistä kiviaineksen korvikkeena. Tämä jae saattaa aiheuttaa ongelmia korkean absorptiokyvyn takia ja se voi heikentää materiaalin kestävyyttä. Euroopassa hienoainekseksi luokitellaan yleensä materiaali, joka läpäisee 75 µm seulan. (Chandler ym. 1997, s. 359)

Pohjakuonan vesipitoisuus vaihtelee yleisemmin 9,4–58,4 % välillä. Vesipitoisuus riippuu yleisesti siitä, miten pohjakuona jäähdytetään polttoprosessin jälkeen. Sen lisäksi myös kuonan kemiallisella koostumuksella on vaikutusta, sillä esimerkiksi korkea jäännöshiilipitoisuus parantaa kosteuden pitokykyä. Vesipitoisuus on tärkeä ominaisuus varsinkin mietittäessä kuonan kuljetusta, varastointia ja käsittelyä joko hävittämistä tai hyödyntämistä varten. (Chandler ym. 1997, s. 92 ja 345)

Absorptio eli veden imeytyminen kertoo kiviaineksen painonmuutoksen, kun sen läpäiseviin huokostiloihin imeytyy vettä. Pohjakuona on erittäin huokoinen materiaali, joten sillä on taipumus absorboida vettä. (Chandler ym. 1997, s. 354-355) Pohjakuonan absorptioarvot vaihtelevat hienolle ja karkealle jakeelle. Karkean jakeen arvot vaihtelevat 3,5 ja 6,2 % välillä, ja hienojakeen 14,3 ja 17,1 % välillä. Yleisimmillä luonnonkiviaineksilla absorptioarvot ovat alle 3 %, joten niihin verrattuna kuonien arvot ovat korkeat. (Izquierdo ym. 2001) Hienojakeen korkea absorptioarvo tarkoittaa sitä, että hienojake voi absorboida suuria määriä vettä. Absorptioarvon avulla voidaan ennustaa kuonan käyttäytymistä eri sovelluksissa, esimerkiksi sen kykyä pidättää vettä tiivistyksen aikana tai sen potentiaalia absorboida asfalttia tierakentamisessa. (Chandler ym. 1997, s. 355)

Pohjakuonan ominaispainoarvot vaihtelevat karkealla kuonalla 1,82 ja 2,43 välillä ja hienolla kuonalla 1,49 ja 1,86 välillä. Ominaispaino on dimensioton suure, joka määritellään näytteen tietyn tilavuuden painon suhteena saman vesimäärän painoon. Pohjakuonan arvojen perusteella se voidaan luokitella kevytsoraksi. (Chandler ym. 1997, s. 353) Myös irtotiheyden perusteella pohjakuona voidaan luokitella kevytsoraksi, sillä arvot vaihtelevat tyypillisesti 955 ja 1420 kg/m<sup>3</sup> välillä (Chandler ym. 1997, s. 356). Taulukossa 1 on esitetty Izquierdon ym. (2001) tekemässä tutkimuksessa saadut pohjakuonan kiintotiheysarvot. Tulokset vaihtelevat 1820 ja 2680 kg/m<sup>3</sup> välillä riippuen mittaustavasta ja kuonajakeesta. Mittaukset suoritettiin standardin EN-1097-6 mukaisesti. Luonnonkivien näennäinen kiintotiheys vaihtelee tyypillisesti välillä 2650–2700 kg/m<sup>3</sup>, joten pohjakuona on hieman kevyempää (Izquierdo ym. 2001). Tiheyden mittaamiseen ja laskemiseen on olemassa eri standardeja (esimerkiksi EN-1097-6) ja tapoja. Valinnan mukaan tulokset voivat vaihdella suurestikin, kuten alla olevasta taulukosta havaitaan.

Taulukko 1. Eri kiintotiheys arvoja (kg/m<sup>3</sup>) hienolle ja karkealle pohjakuonalle Izquierdon ym. (2001) mukaan.

	Hieno pohjakuona (< 5 mm)	Karkea pohjakuona (> 5 mm)
Kiintotiheys, näennäinen	2500 - 2680	2420 - 2490
Kiintotiheys, kyllästetty ja pintakuivattu	2100 - 2200	2290 - 2330
Kiintotiheys, uunikuivattu	1820 - 1920	2150 - 2250

Partikkelien morfologialla on tärkeä vaikutus pohjakuonan fysikaalisiin ominaisuuksiin ja suorituskykyyn. Pyyhkäisyelektronimikroskopia (SEM) kuvista voidaan nähdä, että pohjakuona on kuonamaista materiaalia, jolla on suuri huokoisuus. Tällainen rakenne luo suuren pinta-alan kemiallisille reaktioille sekä mahdollistaa liukoisuusilmiöiden tapahtumisen. (Chandler ym. 1997, s. 368) Huokoisuus vaikuttaa myös absorptio-ominaisuuksiin sekä tiivistymiseen. SEM kuvissa on havaittu myös eri muotoisia partikkeleita, kuten lasipartikkeleja, kuituja, kalsiittikiteitä, alumiinipartikkeleja, naulamaisia ettringiittikiteitä sekä heksagonisia portlandiittikiteitä. (Izquierdo ym. 2001)

### 2.2.2 Kemiallinen koostumus ja emäksisyys

Pohjakuonassa eniten esiintyvät alkuaineet ovat happi, pii, rauta, kalsium, alumiini, natrium, hiili ja kalium (Chandler ym. 1997, s. 379). Noin 80–90 % pohjakuonasta koostuu näistä alkuaineista. Suurimpina pitoisuuksina esiintyvien alkuaineiden sekä myös useiden pienempinä pitoisuuksina esiintyvien alkuaineiden (muun muassa titaani, kloori, mangaani ja barium) pitoisuudet vastaavat maaperässä esiintyviä määriä. Pohjakuonassa on rikastuneena osa pienempinä pitoisuuksina esiintyvistä alkuaineista sekä monet hivenalkuaineet. (Wiles 1996) Erilaisista yhdisteistä eniten esiintyy oksideja, hydroksideja sekä karbonaatteja (An ym. 2014, s. 4). Muun muassa Speiser ym. (2000) ja Qiao ym. (2008) tekemissä tutkimuksissa on havaittu, että piioksidia ( $\text{SiO}_2$ ) esiintyy suurimpina pitoisuuksina, jonka lisäksi kalkki ( $\text{CaO}$ ), rauta(III)oksidi ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) sekä alumiinioksidi ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ovat yleisiä. Li ym. (2016) tekemässä tutkimuksessa on havaittu, että  $\text{SiO}_2$ -pitoisuus nousee partikkelikoon kasvaessa, mutta  $\text{CaO}$  pitoisuus nousee, kun partikkelikoko pienenee.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - ja  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -pitoisuudet pysyvät suunnilleen samana partikkelikoon vaihdellessa.

Pohjakuonassa on havaittu myös orgaanisia yhdisteitä. Orgaanisen hiilen määrä pohjakuonassa vaihtelee yleensä 2 ja 4 % välillä. Pohjakuonasta on löydetty myös mahdollisesti ihmisille haitallisia yhdisteitä kuten polyklooratut dibentsodioksiinit (PCDD), polyklooratut dibentsofuraanit (PCDF) sekä polysykliset aromaattiset hiilivedyt (PAH). Nykyaikaisilla polttolaitoksilla kyseisten yhdisteiden arvot jäävät kuitenkin pieniksi ja vastaavat luonnosta löytyviä arvoja. (Chandler ym. 1997, s. 406–408) Eurooppalainen lainsäädäntö on määrittänyt jätteenpolton kuonalle orgaanisen aineksen raja-arvot. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2010/75/EU artiklassa 50.1. määritellään, että kuonassa olevan orgaanisen hiilen kokonaismäärä on oltava alle kolme prosenttia tai niiden hehkutushäviön on oltava alle viisi prosenttia aineen kuivapainosta.



Pohjakuonan pH vaihtelee 10,5 ja 12,2 välillä, joka johtuu osittain kalkin hydrolyysissä muodostuvasta kalsiumhydroksidista. Pohjakuonan puskurikyky on tärkeä osa kuonien liukoisuusominaisuuksia. Tutkimusten perusteella on todettu, että pohjakuona on kohtuullisen hyvin puskuroitu ja se vastustaa kohtalaisesti pH:n muutoksia. Hapon neutralointikyky kuitenkin vaihtelee jossain määrin ajan kuluessa. (Chandler ym. 1997, s. 372)

### **2.2.3 Mineralogia**

Pohjakuona sisältää lukuisia kiteisiä faaseja, mutta vain pääfaasit voidaan tunnistaa röntgensädediffraktion (XRD) avulla. Pohjakuonan pääkomponentit ovat amorfinen lasi, kvartsi ja kalsiitti. Pienemmissä määrin esiintyviä faaseja ovat maasälpä, hematiitti, magnetiitti, diopsidi, wollastoniitti, dolomiitti, kristobaliitti ja savimineraalit. Hieno jae sisältää vaihtelevissa määrin sulfaatteja, kuten esimerkiksi kipsiä. Lisäksi on havaittu myös joitain muita faaseja, kuten larniittia. (Izquierdo ym. 2001)

### **2.2.4 Liukoisuusominaisuudet**

Jätteenpolton kuonat sisältävät liukenevia suoloja sekä raskasmetalleja, jonka takia liukoisuusominaisuudet ovat tärkeä parametri arvioitaessa pohjakuonien hyödyntämisen ympäristövaikutuksia. Eri mailla on omat standardinsa liukoisuustestien suorittamiseksi ja raja-arvot myrkyllisille alkuaineille liukoisuuksien arvioimiseksi. (An ym. 2014, s. 6)

Suomessa pohjakuonaa voidaan hyödyntää eräissä maarakentamiskohteissa ilman ympäristölupaa, kunhan tietyt edellytykset täyttyvät. Nämä edellytykset on kerrottu niin sanotussa MARA-asetuksessa (Valtioneuvoksen asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 843/2017). Kyseissä asetuksessa on liitteessä 2 määritelty haitallisten aineiden raja-arvot, muut laatuvaatimukset sekä jätteen enimmäiskerrospeaksuuden maarakentamiskohteessa. Jätteenpolton pohjakuonaa koskevat määritysvaatimukset on esitelty taulukossa 2. Haitallisten aineiden liukoisuudet on määriteltävä standardin CEN/TS 14405 mukaisen läpivirtaustestin, standardin SFS-EN 12457-2 mukaisen kaksivaiheiden ravistelutestin tai vastaavan menetelmän avulla.

Taulukko 2. Jätteenpolton pohjakuonan suurin sallittu haitallisten aineiden liukoisuus (mg/kg L/S suhteessa 10 l/kg) sekä kerrospaksuus maarakentamiskohteessa (Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 934/2017).

	Maarakentamiskohde				
Haitallinen aine	Väylä		Kenttä		Teollisuus- ja varastorakennuksen pohjarakenne
	Jätteen kerrospaksuus ≤ 1,5m		Jätteen kerrospaksuus ≤ 1,5m		Jätteen kerrospaksuus ≤ 1,5m
	Peitetty	Päällystetty	Peitetty	Päällystetty	
Antimoni (Sb)	0,7	0,7	0,3	0,7	0,7
Arseeni (As)	1	2	0,5	1,5	2
Barium (Ba)	40	100	20	60	100
Kadmium (Cd)	0,04	0,06	0,04	0,06	0,06
Kromi (Cr)	2	10	0,5	5	10
Kupari (Cu)	10	10	2	10	10
Elohopea (Hg)	0,03	0,03	0,01	0,03	0,03
Lyijy (Pb)	0,5	2	0,5	2	2
Molybdeeni (Mo)	1,5	6	0,5	6	6
Nikkeli (Ni)	2	2	0,4	1,2	2
Vanadiini (V)	2	3	2	3	3
Sinkki (Zn)	15	15	4	12	15
Seleen (Se)	1	1	0,4	1	1
Fluoridi (F <sup>-</sup> )	50	150	10	50	150
Sulfaatti (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	5900	18 000	1200	10 000	18 000
Kloridi (Cl <sup>-</sup> )	3200	11 000	800	2400	11 000
Liuennut orgaaninen hiili (DOC)	500	500	500	500	500

Liukeneminen on seurausta kemiallisten ja fysikaalisten tekijöiden vuorovaikutuksesta. Muun muassa jätteen koostumus ja mineralogia, lämpötila, pH, ominaispinta-ala, huokoisuus ja partikkelikoko vaikuttavat liukoisuuteen. Jättemateriaaleilla vapautuvien epäpuhtauksien määrä riippuu pikemminkin liukenemiseen saatavilla olevien epäpuhtauksien määrästä, joka on murto-osa epäpuhtauksien kokonaismäärästä kyseisestä jätteestä. (Sabbas ym. 2003)

Maailmanlaajuisesti on raportoitu raskasmetallien, kuten kuparin, lyijyn ja sinkin, liukenemisen ylittävän huomattavasti paikalliset raja-arvot (Van Gerven ym. 2005). Liuenneet epäpuhtaudet voivat aiheuttaa maaperän, pohjavesien ja pintavesien pilaantumista. Liukoisuuksia arvioitaessa on tärkeä ottaa huomioon vaikutukset sekä lyhyellä, että pitkällä aikavälillä. Aineiden liukoisuuskäyttäytymisestä lyhyellä aikavälillä on hyvin tietoa saatavilla, mutta pitkän aikavälin vaikutuksia on vaikeampi arvioida. (Sabbas ym. 2003) Haitallisten aineiden liukoisuutta ja sen aiheuttamia mahdollisia ympäristöongelmia voidaan vähentää muun muassa pohjakuonan ikäännyttämisellä ja karbonoimisella, joiden avulla saadaan laskettua kuonan pH:ta sekä haitallisten metallien vapautumista. Myös kuonan yhdistäminen sementtiin ja betoniin vähentää haitallisten aineiden liukoisuutta. (An ym. 2014, s. 7)

### **2.2.5 Ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät**

Pohjakuonan ominaisuuksiin vaikuttavat poltettavan jätteen laatu ja koostumus sekä käytettävä polttotekniikka ja -parametrit (Kaartinen ym. 2010, s. 22). Polttoprosessin jälkeen pohjakuonan laatuun voidaan vaikuttaa erilaisilla jälkikäsittelyillä, kuten ikäännyttämisellä. Kuonien käsittelytavoista on lisää kappaleessa 2.3.

Kotitalouksien sekajäte koostuu biojätteestä, paperista, kartongista ja pahvista, puusta, muovista, lasista, metallista, tekstiileistä, sähkölaitteista ja akuista, vaarallisista kemikaaleista ja muusta sekalaisesta jätteestä. Suomessa suurimpina osuuksina esiintyy biojäte, muovi sekä muu sekalainen jäte. (Suomen Kiertovoima Ry, 2020) Lähes kaikki jakeet sisältävät jossain määrin raskasmetalleja muun muassa lyijyä, kadmiumia, kromia, elohopeaa ja nikkeliä, jotka luokitellaan myrkylliseksi tiettyinä pitoisuuksina. Kadmiumin lähteitä ovat muun muassa värillinen sanomalehtipaperi, muovikalvot ja muoviset taloustavarat ja ruokapakkaukset. Kromin lähteitä ovat edellä mainittujen lisäksi muun muassa puu, tekstiilit sekä jalkineet. Lyijyn lähteitä ovat pääasiassa muovit, pihajätteet, tekstiilit sekä pienet laitteet. (Hasselriis ja Licata 1996)

Rendekin ym. (2007) tekemässä tutkimuksessa tutkittiin kuudesta eri polttolaitoksesta peräisin olevien pohjakuonien koostumusta. Tutkimuksessa havaittiin, että alueilla, jossa jätteet lajiteltiin ennen polttoa, pohjakuonaan päätyi vähemmän piitä, sillä lasipullot ja -purkit päätyivät kierrätykseen. Kun jätteessä oli mukana kotitalousjätteen lisäksi teollisuusjätettä, rikin pitoisuus nousi. Kloorin pitoisuudet taas olivat suurimpia laitoksissa, jossa poltettiin suuria määriä muovia.

## 2.3 Kuonien käsittely

Pohjakuonien käsittelyllä pyritään parantamaan kuonan ympäristö- ja teknisiä ominaisuuksia sekä erottamaan joukosta arvokkaat aineet, kuten metallit. Erilaiset prosessointitekniikat voidaan jakaa kemiallisiin, fysikaalisiin ja termisiin menetelmiin. (Kaartinen ym. 2010)

### 2.3.1 Kemialliset menetelmät

Kemiallisiin menetelmiin kuuluvat ikäännytyks sekä pesu. Ikäännyttämisen avulla pohjakuona saadaan stabiilimpaan tilaan, kun reaktiivisuus ja metallien liukoisuus vähenevät. Pohjakuonaa varastoidaan tyypillisesti avoimessa tilassa useiden viikkojen ajan. Ikäännyttäminen on luonnollisesti hidas tapahtuma, mutta sitä voidaan kiihdyttää kastelun ja hiilidioksidin lisäämisen avulla. (Kaartinen ym. 2010) Ikäännyttämisen aikana tapahtuu monimutkainen sarja useita toisiinsa liittyviä reaktioita (Sabbas ym. 2003), joista tärkeimpiä ovat kalkin hydrataatio, portlandiitin muodostuminen ja karbonoituminen, metallien (rauta ja alumiini) korroosio, (di)sulfidien hapettuminen, kalsiumsilikaattihydraattien muodostuminen ja karbonoituminen sekä muun muassa ettringiitin ja monosulfaatin muodostuminen ja karbonoituminen. Kalkin hydrataatio alkaa välittömästi pohjakuonan sammutuksen jälkeen ja reaktiossa syntyy portlandiittia ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). (Nørgaard ym. 2019) Karbonoituminen on kaikista tärkein ikääntymisen prosessi. Reaktiossa saostuu kalsiittia ( $\text{CaCO}_3$ ), kun emäksinen materiaali reagoi hiilidioksidin kanssa. Tämän myötä pH laskee ja useiden haitta-aineiden liukoisuudet pienenevät (Nørgaard ym. 2019; Sabbas ym. 2003).

Vesipesu on yksinkertainen prosessi, jolla saadaan poistettua vesiliukoisia aineisosa pohjakuonasta. Pesulla poistettavia aineisosa ovat pääasiassa kloridi- ja alkali-ionit. (Sabbas ym 2003) Sen sijaan raskas- ja hivenmetallien poistossa pesu ei ole niin tehokas (Chandler ym. 1997, s. 741). Yleensä pohjakuona jäähdytetään vedellä polttoprosessin jälkeen. Useimmiten näissä vesialtaissa on suhteellisen matalat neste/kiinteä -suhteet ja viipymäajat, jonka vuoksi liukoisia aineosia jää kuonaan myös jäähdytyksen jälkeen. Pesu voisi kuitenkin olla helposti yhdistettävissä pohjakuonan jäähdytysvaiheeseen. (Sabbas ym. 2003) Pesun haittapuolena on lisääntyvä jäteveden määrä ja jätevetteen liuenneet haitta-aineet, joiden puhdistaminen voi aiheuttaa lisäkustannuksia (Chandler ym. 1997, s. 741).

### 2.3.2 Fysikaaliset menetelmät

Fysikaalisiin menetelmiin kuuluvat raekoon pienennys, seulonta, tiheyserottelu, magneettierotus sekä pyörrevirtaerotus (Eddy Current separation) (Kaartinen ym. 2010). Kuonan raekoko saadaan pienemmäksi murskaamalla. Käsittelyyn voidaan käyttää iskumurskainta, leukamurskainta tai valssimurskainta. Murskaimen valinnassa täytyy ottaa huomioon syötettävän kuonan koostumus, sillä esimerkiksi leukamurskainta käytettäessä isot metallin palaset tai muut palamattomat materiaalit voivat aiheuttaa murskaimen tukkeutumisen. Murskauksessa hauraiden materiaalien raekoko pienenee, mutta esimerkiksi metallit vain mahdollisesti litistyvät tai vääntyvät, mutta pysyvät muuten ehjinä. Murskauksessa täytyy ottaa huomioon myös kuonan jatkokäyttö; esimerkiksi jos kuona halutaan käyttää soran korvikkeena tierakentamisessa, sitä ei voi murskata kovin pieneksi, jotta sen käytettävyyys ei kärsi. (Bunge 2019, s. 25-27)

Metallien erottamiseksi on tärkeää, että kuona luokitellaan ennen jatkokäsittelyä. Luokittelu tapahtuu yleensä seulomalla. Käytetyin seula kuonien käsittelyssä on täryseula. Täryseulassa tärinä saa aikaan materiaalin liikkeen, jonka seurauksena hienoinen putoaa aukkojen läpi seulan alaosaan ja karkeampi materiaali jää kannen päälle. Jos kuonassa on suuria kappaleita, se voidaan seuloa ensin säleikön avulla. Säleikön seulontajäännös, joka koostuu pääosin romumetallista, voidaan syöttää rumpuseulaan. Rumpuseulassa pyörimisliike saa aikaan metallin ja mineraalien erottumisen. Mineraaliainetta seulotaan rummun takaosassa ja ulos saadaan korkealaatuista romumetallia. (Bunge 2019, s. 28-29)

Pohjakuonan korkealaatuinen kierrätys vaatii tarkan partikkelikokoon perustuvan luokittelun. Hienojakeen (0–12 mm) luokittelu perinteisillä raekokoon perustuvilla tekniikoilla on haastavaa kyseisen jakeen vesipitoisuuden vuoksi. Eniten kosteutta on 0–2 mm jakeessa, jonka seurauksena koko hienojake on tahmea. Tämän vuoksi on tärkeää poistaa 0–2 mm raekoko kuonasta, jotta loppuosa jakeesta on helpompi käsitellä. Tätä varten on kehitelty ADR-teknologia, jonka avulla saadaan erotettua kostea materiaali 2 mm asti ilman kuivausta tai veden lisäystä. (de Vries ym. 2014) ADR-teknologiassa materiaali syötetään rumpuun, joka kiihdyttää partikkeleita, kunnes ne irtoavat ja kulkeutuvat kokonsa mukaan määräytyviä lentoratoja pitkin. Pienemmät partikkelit putoavat lähemmäs rumpua ja suuremmat partikkelit lentävät kauemmas. (Bunge 2019, s. 31)

Pohjakuonan käsittelyssä yleisimmät metallien lajittelutavat ovat magneettierotus ja pyörrevirtaerotus. Magneettisten metallien erottamiseen voidaan käyttää rumpumagneettierottimia tai hihnamagneettierottimia. Rumpuerotin koostuu paikallaan pysyvistä magneetista ja sen ympärillä pyörivästä ei-magneettisesta vaipasta. Magneettiset metallit jäävät kiinni magneettiin ja näin saadaan erotettua magneettiset metallit ja muut partikkelit toisistaan. Hihnaerottimissa materiaali kulkee hihnalla ja yläpuolelle sijoitettu magneetti kerää syötteen joukosta magneettiset metallit. Pyörrevirtaerottimella saadaan erotettua ei-magneettiset mutta sähköä johtavat metallit, kuten ei-rautametallit. Materiaali syötetään hihnaa pitkin roottorille, jossa muodostuu magneettikenttä. Magneettikenttä lennättää sähköä johtavat metallit pois syötteen joukosta, kun taas sähköä johtamattomat hiukkaset jatkavat samalla liikeradalla. Pyörrevirtaerottimen erotustehokkuus riippuu hiukkasen johtavuudesta sekä tiheydestä. Alumiini ja kupari saadaan tehokkaasti erotettua pyörrevirtaerottimen avulla. (Bunge 2019, s. 32-37)

### 2.3.3 Termiset menetelmät

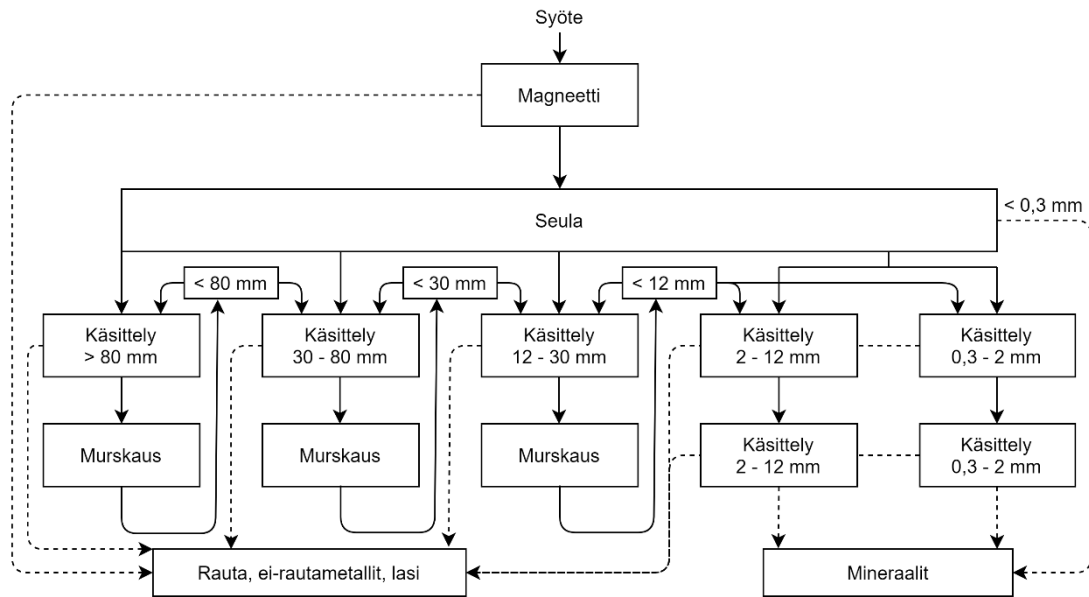
Termisen käsittelyn tavoitteena on vähentää haitta-aineiden liukoisuutta, pienentää materiaalitulavuutta ja saada aikaiseksi materiaali, joka voidaan käyttää uudelleen (Sabbas ym. 2003). Termisiä menetelmiä ovat vitrifikaatio, sulatus ja sintraus. Menetelmät eivät juurikaan eroa prosessin osalta, vaan ero tulee käsitellyn materiaalin ominaisuuksista. (Chandler ym. 1997, s. 791) Vitrifikaatiossa muodostuu amorfinen yksifaasinen lasituote, kun lasinmuodostajaa ja käsiteltävää materiaalia sulatetaan korkeassa lämpötilassa. Sulattaminen on samankaltainen prosessi kuin vitrifikaatio, mutta siinä ei lisätä lasinmuodostajaa. Sulatuksessa syntyy monifaasinen tuote, josta on mahdollista erottaa tietyt metallifaasit ja kierrättää ne. Sintrauksessa materiaalia lämmitetään kemiallisten faasien uudelleenjärjestämisen mahdollistamiseksi. Termisten menetelmien etuna on syntyvä tuote, joka on homogeenisempi, tiiviimpi ja sillä on paremmat liukoisuusominaisuudet. Haittapuolena on, että varsinkin vitrifikaatiossa ja sulatuksessa vapautuu haihtuvia alkuaineita, kuten elohopeaa ja lyijyä. (Sabbas ym. 2003) Lisäksi pohjakuonien käsittely termisillä menetelmillä ei yleensä ole taloudellisesti houkutteleva vaihtoehto, ellei tarkoituksena ole käyttää kuonaa esimerkiksi lasinvalmistuksen raaka-aineena. (Chandler ym. 1997, s. 803)

### 2.3.4 Kuonan käsittelyprosessit

Pohjakuonan prosessointikonseptit voidaan jaotella kuiviin ja märkiin prosesseihin (Kaartinen ym. 2010). Yleisesti on käytössä kolme erilaista prosessia: kuivan pohjakuonan kuiva käsittely, märän pohjakuonan kuiva käsittely ja märän pohjakuonan märkä käsittely (Šyc ym. 2020). Pohjakuonan käsittelylle ei ole yhtenäisiä toimintatapoja, vaan ne ovat laitospohjaisia. Pohjakuonan käsittelyprosessin valinta riippuu muun muassa kuonan määrästä, millä tekniikalla kuona on poistettu poltosta (kuiva/märkä), laitoksen sijainnista ja kuonan loppusijoituksesta (Bunge 2019, s. 48).

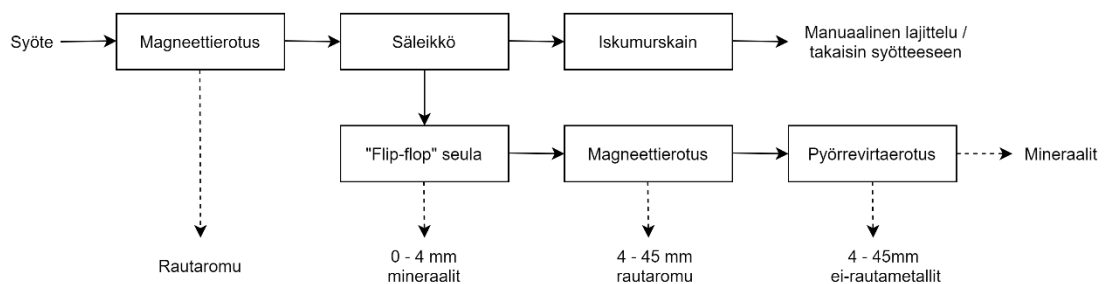
Valinta kuivan ja märän käsittelyn välillä riippuu ensinnäkin siitä, millä tekniikalla pohjakuona on poistettu polttoprosessista, kuivalla vai märällä tekniikalla. Märän menetelmän etuna on pölyttömyys sekä se, että kosteissa olosuhteissa pohjakuonan stabilointireaktiot käynnistyvät, mikä on välttämätöntä kuonan hyödyntämiseksi rakentamisteollisuudessa. Kosteaa pohjakuona aiheuttaa kuitenkin haasteen metallien talteenotolle tahmean olomuodon vuoksi. Kuivat menetelmät ovat suhteellisen harvinaisia, mutta niillä on monia etuja. Kuivasta pohjakuonasta metallit saadaan paremmin talteen ja lisäksi säästetään veden kulutuksessa ja käsittelyssä, sekä kuljetuskustannuksissa. Haittapuolena kuiva pohjakuona aiheuttaa pölyongelman ja se on käsiteltävä ja säilöttävä suljetuissa tiloissa. Lisäksi jos pohjakuonan haluaa hyödyntää rakennusteollisuudessa, se vaatii jatkokäsittelyn. (Lamers 2015; Šyc ym. 2018; Šyc ym. 2020)

Sveitsissä on käytössä kuivan kuonan kuivakäsittelylaitos. Prosessin tehokkuutta on parannettu käyttämällä suljettua kiertokulkua yli 12 mm partikkeleille ja asentamalla alle 12 mm partikkeleita käsittelevät laitteistot sarjaan (Böni ja Morf 2018). Kuvassa 1 näkyy laitoksen prosessikaavio. Prosessi sisältää useita seuloja, murskaimia, magneettierotuksia sekä pyörrevirta-, ruostumaton teräs- sekä lasierottimia (Šyc ym. 2020).



Kuva 1. Prosessikaavio sveitsiläiselle kuivan pohjakuonan kuivalle käsittelylle (mukaillen Böni ja Morf 2018).

Ensimmäisestä märän kuonan kuivakäsittelyprosessista raportoi Schmelzer (1995). Tässä yksinkertaisessa prosessissa pohjakuona ensin kuivattiin ja seulottiin kahteen eri rekokoon. Tämän jälkeen pohjakuona käsiteltiin erikseen magneettierottimella ja pyörrevirtaerottimella. Kuvassa 2 on prosessikaavio Schmelzerin (1995) raportoimalle kuivalle käsittelylle. (ks. Šyc ym. 2020)

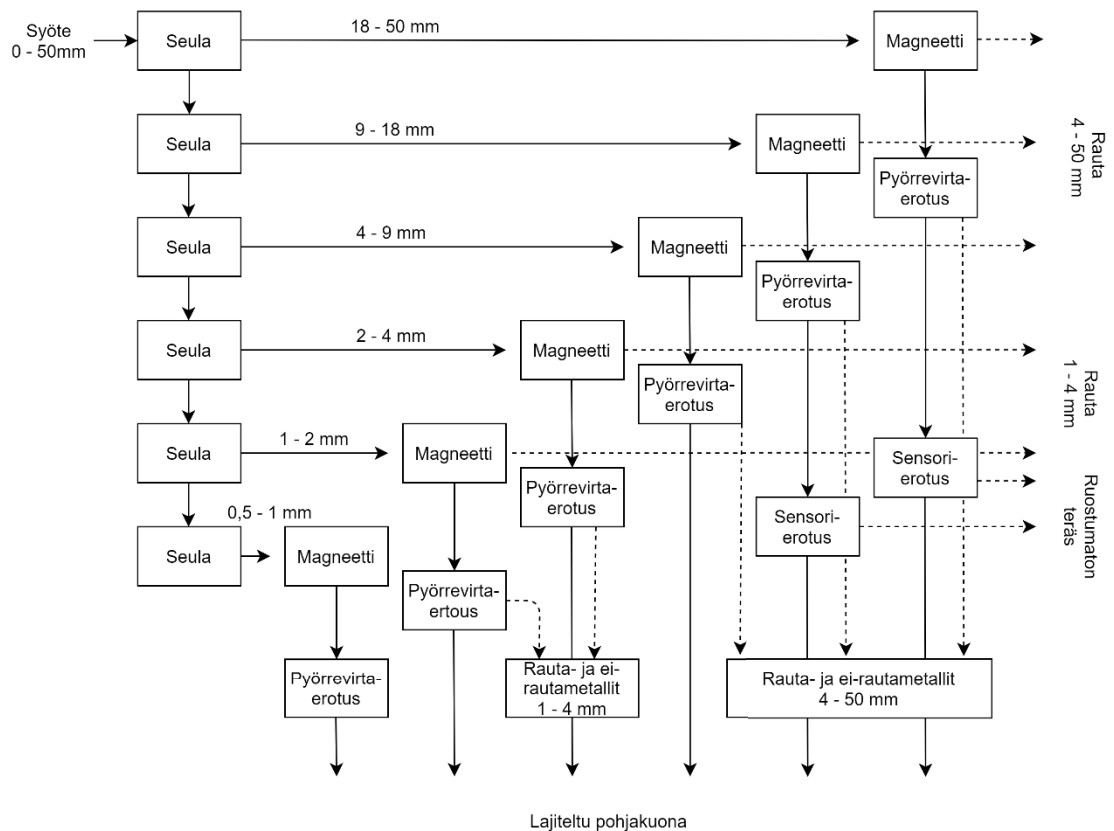


Kuva 2. Perinteisen kuivakäsittelyn prosessikaavio (mukaillen Schmelzer 1995; Šyc ym. 2020).

Kuonan prosessointitapojen kehitystä on ajanut erityisesti metallien hintojen nousu, ympäristöongelmat ja Euroopan Unionin kestävä kehitys ja kriittisten materiaalien strategiat (Šyc ym. 2020). Esimerkiksi Tanskassa on käytössä kehittyneempi märän kuonan kuivakäsittelytekniikka. Siinä märkä kuona ensin varastoidaan kahdesta kolmeen kuukautta, jonka aikana se kuivuu. Tämän jälkeen syöte seulotaan kuuteen eri raekokoon,



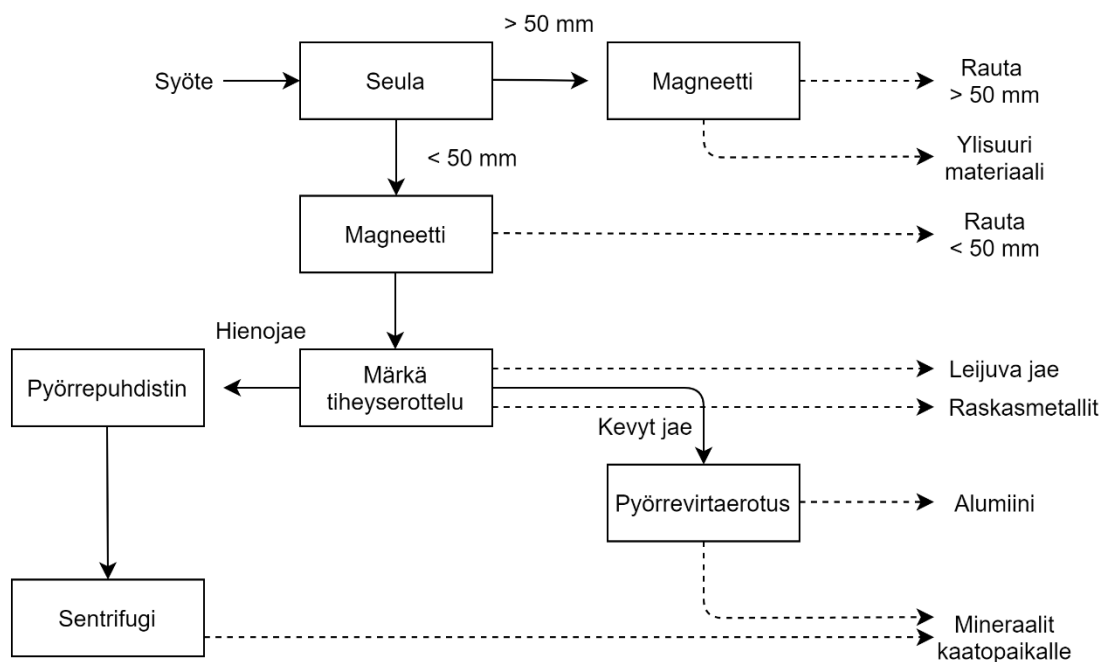
jonka jälkeen jokainen jae käsitellään magneettierotuksella sekä pyörrevirtaerottimella, ja isoimmat raekoot vielä sensorierottimella (Kallesøe ja Dyhr-Jensen 2018). Kuvassa 3 esitellään tanskalaisen käsittelylaitoksen prosessikaavio.



Kuva 3. Kehittyneemmän kuivakäsittelyn prosessikaavio (mukaillen Kallesøe ja Dyhr-Jensen 2018; Šyc ym. 2020)

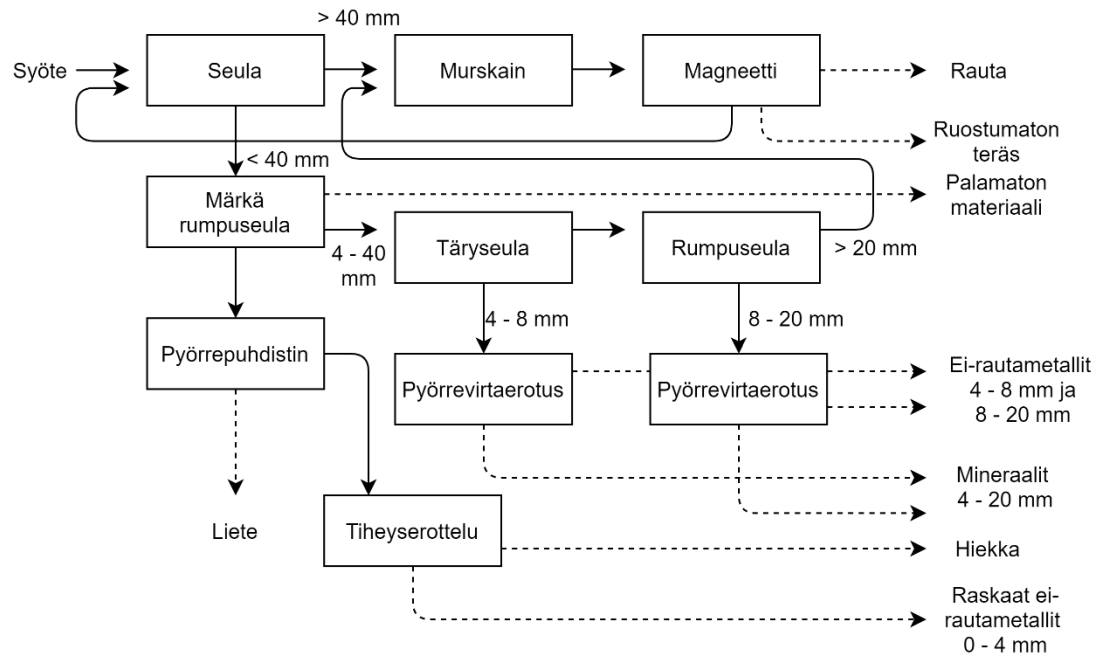
Märkää pohjakuonaa voidaan käsitellä myös märällä tekniikalla. Märässä prosessissa prosessiin lisätään suuri määrä vettä tiettyihin vaiheisiin. Märkään tekniikkaan käytetään yleensä kahta lähestymistapaa. Ensimmäisessä märkää käsittelyä käytetään pääasiassa metallien erottamiseen ja toisessa tavoitteena on parantaa kuonan ympäristöparametrejä. (Šyc ym. 2020) Brantner&Co operoi pohjakuonaa märällä tekniikalla. Kuvassa 4 on yhtiön prosessin kaavio. Prosessissa syöte seulotaan ensin kahteen eri raekokoluokkaan, jonka jälkeen molemmat jakeet menevät magneettierotukseen. Pienempi raekoko jatkaa tämän jälkeen märkään tiheyteen perustuvaan erotteluun, josta saadaan ulos neljä eri jaetta. Leijuva jae sisältää muovia, puuta ja kevytbetonia. Painava ei-rautametallijae sisältää metalleja, joiden tiheys on suurempi kuin  $4 \text{ g/cm}^3$  kuten kupari ja ruostumaton teräs. Metallit puhdistuvat erotuksen aikana ja ne voidaan myydä suoraan eteenpäin. Kevyt jae sisältää muun muassa alumiinia, tuhkaa, lasia ja keramiikkaa. Tämä jae

kuivatetaan ja johdetaan pyörrevirtaerottimeen, jossa saadaan erotettua alumiini. Viimeinen jae on vettä, joka sisältää alle 2 mm partikkeleja. Tämä jae käsitellään pyörrepuhdistimessa, vesi palautuu takaisin prosessiin ja alle 2 mm partikkelit johdetaan erilliselle käsittelylaitokselle, jossa jakeesta erotellaan metallit. (Stockinger 2018; Šyc ym. 2020)



Kuva 4. Brantner&Co yhtiön märän käsittelyn prosessikaavio (mukaiillen Stockinger 2018; Šyc ym. 2020).

Hollannissa on käytössä märkäprosessi, jonka tarkoituksena on parantaa mineraalijakeen liukoisuusominaisuuksia. Tekniikassa erotellaan ensin metallit ja sen jälkeen pestään liukoiset suolat ja metallit pohjakuonan mineraalijakeesta. Vain kaikista hienoin jae pestään, sillä liukoisimmat metallit ja ympäristölle haitallisimmat aineet ovat tässä jakeessa. Kuvassa 5 on esitetty tekniikan prosessikaavio. Ensimmäisenä syöte seulotaan kahteen eri rekokoon. Suurempi jae jatkaa murskaimelle ja siitä metallin erotukseen. Pienempi jae syötetään märkään rumpuseulaan, jossa alle 4 mm jae erotetaan ja johdetaan pyörrepuhdistimeen. Pyörrepuhdistimesta rekokooltaan 63  $\mu\text{m}$  – 4 mm jae johdetaan tiheyserottimeen, jossa saadaan erotettua painavat ei-rautametallit kevyistä ei-rautametalleista. Rumpuseulassa syntynyt suurempi jae jaetaan kolmeen eri rekokoon täriseulan ja rumpuseulan avulla. Tämän jälkeen 4–8 mm ja 8–20 mm jae syötetään pyörrevirtaerottimeen. Yli 20 mm jae palaa takaisin murskaimelle, metallin erotteluun ja sen jälkeen takaisin syötteeseen. (Born 2018; Šyc ym. 2020)



Kuva 5. Hollannissa käytössä oleva märän käsittelyn prosessikaavio (mukaillen Born 2018, Syc ym. 2020 mukaan).

### 3 POHJAKUONAN KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET

Pohjakuonalle on etsitty monia eri käyttömahdollisuuksia. Kuonaa on muun muassa tutkittu käytettäväksi portlandsementin raaka-aineena sekä korvaamaan luonnonkiviaines betonituotteissa. Sen lisäksi on tutkittu kuonan käyttömahdollisuuksia lasin, keramiikan sekä kevyen runkoaineksen valmistuksessa sekä kasvien kasvualustan komponenttina. Pohjakuonaa voidaan hyödyntää myös maarakentamisessa.

#### 3.1 Pohjakuona sementin, betonin ja kevyen runkoaineksen raaka-aineena

Muun muassa Pan ym. (2008) ovat tutkineet jätteenpolton pohjakuonan hyödyntämistä portlandsementissä. Taiwanissa tehdyssä tutkimuksessa pohjakuona ensin jauhettiin, kuivattiin ja seulottiin, jonka jälkeen kokeiltiin vesi- ja happopesuja kloridien poistamiseksi. Paras kloridien poistotehokkuus saatiin, kun kuona pestiin ensin vedellä ja sen jälkeen etikkahapolla. Kuonan pääkomponenttien todettiin olevan samoja kuin tavallisessa portlandsementissä, joten siltä osin kuonan todettiin soveltuvan sementin raaka-aineeksi. Kuonaa käytettiin korvaamaan osa valmistukseen käytettävästä savesta. Valmistetun sementin tutkimuksissa huomattiin, että kuonan käytöllä ei ollut vaikutuksia sementin laatuun, vaan esimerkiksi sementin puristuslujuus pysyi ennallaan. Kuonan käyttö kuitenkin pidensi jonkin verran sementin kovettumisaikaa, jonka epäiltiin johtuvan kuonan raskasmetallipitoisuuksista.

An ym. (2014) ovat tutkineet hiekan korvaamista pohjakuonalla betonin valmistuksessa. Tutkimuksessa havaittiin, että kuonan lisääminen vaikutti heikentävästi betonin laatuun. Kun kuonalla korvattiin 10 % hiekasta, puristuslujuus pysyi vertailukelpoisena perinteisen betonin kanssa. Sitä suuremmat kuonan määrät laskivat puristuslujuutta. Kuonan lisäys nosti myös huomattavasti betonin imukykyä. Betonin laadun heikkenemisen syynä arveltiin olevan vetykaasun muodostuminen alumiinin reagoidessa erittäin emäksisessä ympäristössä sekä pastan/tahnan ja kiviaineen erottuminen johtuen sakeuden alenemisesta kuonapitoisuuden noustessa. Myös Keulen ym. (2016) ovat tutkineet pohjakuona käyttöä betonin valmistuksessa. He kehittivät uuden lähestymistavan, jossa kuona käsiteltiin ensin sekä kuivilla, että märillä käsittelytekniikoilla ja jonka jälkeen sitä hyödynnettiin maakostean betonin valmistuksessa. Kokeessa valmistettiin reunakiviä sekä katukiviä, jotka koostuivat

kahdesta betonikerroksesta. Pohjakuonalla korvattiin alakerroksessa käytetty sora. Tutkimuksessa havaittiin, että pohjakuonan lisäys ei vaikuttanut negatiivisesti reuna- ja katukivien ominaisuuksiin. Luonnonsorasta korvattiin jopa 100 % kuonalla, mutta siitä huolimatta seokset säilyttivät tarvittavat fysikaaliset ja kemikaaliset ominaisuudet kuten työstettävyyden, lujuuden sekä jäädytys-sulatusrajat. Kuonan käyttö ei myöskään vaikuttanut betonin kokonaispäästöihin tai liukoisuusominaisuuksiin. Muun muassa Hollannissa ja Suomessa myydään käsiteltyä pohjakuonaa käytettäväksi betonin runkoaineena hiekan ja soran korvikkeena. Suomessa on myynnissä Suomen Erityisjäte Oy:n valmistamia Scanwas-keinokiviainestuotteita, jotka ovat syntyneet, kun pohjakuonaa on käsitelty ADR-kuivaerotustekniikalla. (Mineralz 2021; Suomen Erityisjäte 2021)

Pohjakuonan käyttöä kevyen runkoaineksen valmistuksessa on myös tutkittu. Tutkimuksia on tehty sekä pelkän pohjakuonan avulla, että lisäämällä kuonaan hiilen poltosta muodostunutta lentotuhkaa sekä biomassaa. Cheeseman ym. (2005) tekivät tutkimuksen pelkällä pohjakuonalla, josta ikäännyttämisen jälkeen erotettiin alle 8 mm jae. Tämä jae jauhettiin ja sekoitettiin huolellisesti, jonka jälkeen kuonan joukkoon lisättiin vettä pellettien valmistamiseksi. Pelletit kuivattiin ja sintrattiin 900–1080 °C lämpötilassa ja muodostuneiden pellettien ominaisuuksia verrattiin kaupallisesti käytössä olevaan kevyeen runkoaineeseen. 1000–1050 °C lämpötilassa sintratut pohjakuona pelletit olivat tiheydeltään ja puristusmurtolujuudeltaan verrattavissa kaupalliseen tuotteeseen. Tutkimuksessa havaittiin kuitenkin, että happamissa oloissa erityisesti sinkin ja lyijyn liukeneminen on mahdollista. Bethanis ja Cheeseman (2004) ovat tutkineet vaihtoehtoa, jossa pohjakuonan lisäksi käytettiin hiilen poltossa syntyvää lentotuhkaa. Lentotuhkaa lisättiin pohjakuonan sintrausominaisuuksien kontrolloimiseksi. Valmistetuissa pelleiteissä oli 40 % pohjakuonaa ja 60 % lentotuhkaa. Valmistetun runkoaineen tiheys ja lujuus oli verrattavissa kaupalliseen runkoaineeseen. Kun valmistettuun seokseen lisättiin vielä jäteaktiivihieletä, tiheys pieneni ja veden imeytyminen kasvoi. Giro-Paloma ym. (2019) tekemässä tutkimuksessa havaittiin, että lisäämällä riisinkuorta pohjakuonan sekaan saatiin aikaan runkoaine, jonka puristuslujuus ja veden imeytyminen olivat samanlaiset tai paremmat kun verrattavalla kaupallisella runkoaineella.

### 3.2 Pohjakuona lasin raaka-aineena ja kasvualustana

Monteiro ym. (2006) ovat tutkineet lasin valmistusta pohjakuonasta. Pohjakuona oli jo aikaisemmin käsitelty metallien ja ei-rautametallien poistamiseksi ennen läjitystä. Ennen lasin valmistusta kuonan raekokoa pienennettiin jauhamalla. Lasi valmistettiin vitrifikaatiolla, jossa noin 100 grammaa pohjakuonaa kuumennettiin asteittain haluttuun lämpötilaan (1300 tai 1400 °C). Sulate kaadettiin muottiin ja muotti siirrettiin 600 °C uuniin, jossa sulatetta hehkutettiin tunnin ajan. Tämän jälkeen näyte sai jäähtyä huoneenlämpöön. Valmiit näytteet leikattiin ja kiillotettiin kokeita varten. Tutkimuksessa valmistui homogeeninen kiiltävä musta lasi. Tutkimuksessa havaittiin, että valmistetun lasin lujuus ja murtumislujuus olivat samankaltaisia kuin verratuilla kaupallisilla lasilla. Lasivalmisteen liukoisuusominaisuudet olivat myös hyviä niin vedessä kuin emäksisessä liuoksessa.

Pohjakuona sisältää kasvien kasvun kannalta hyödyllisiä aineita, kuten kalsiumia. Tämän vuoksi on tutkittu myös pohjakuonan käyttömahdollisuuksia kasvien kasvualustana. Sormunen ym. (2016) tekemässä tutkimuksessa pohjakuona käsiteltiin ensin ADR-tekniikalla, joka koostui seulonnasta, magneettierotuksesta, tuulitunnelista, pyörrevirtaerotuksesta sekä ADR-erotuksesta. Tutkimuksessa käytettiin kolmea alle 12 mm jaetta, joista valmistettiin kolme erilaista seosta kasvualustaksi. Testikasveina olivat rairuoho ja ohra. Pohjakuonalla ei havaittu olevan vaikutusta kasvien kasvuun. Tutkimuksessa havaittiin, että pohjakuonan määrän ollessa alle 20 % kasvualustasta, haitallisten metallien liukoisuuskonsentraatiot olivat lähellä maanviljelymaita. Tällä hetkellä pohjakuonaa ei saa käyttää kaupallisissa lannoitteissa, mutta sitä voisi käyttää esimerkiksi kaatopaikoilla ja suljetuilla teollisuusalueilla hiekan korvikkeena ympäristöluvan avulla. Tutkimuksessa todettiin, että aihe vaatii vielä lisää tutkimuksia, joissa voitaisiin myös tutkia enemmän mahdollisia riskejä, kuten haitallisten aineiden liukenemista pohjavesiin.

### 3.3 Ohjeet pohjakuonan hyödyntämiseksi maarakentamisessa

Uusiomateriaalien käytön kannalta keskeisiä lakeja ja säädöksiä ovat muun muassa jätelaki (646/2011), jäteasetus (179/2012), ympäristönsuojelulaki (527/2014), ympäristönsuojeluasetus (713/2014) ja EU:n rakennustuoteasetus (EU 305/2011) (Väylävirasto 2020a, s. 21). Näitä lakeja ja asetuksia on käyty tarkemmin läpi esimerkiksi

Väyläviraston julkaisussa Uusiomateriaalien käyttö väylärakentamisessa (2020a). Jätteiden hyödyntämisen edistämiseksi on säädetty MARA-asetus (843/2017), joka mahdollistaa joidenkin jätteiden hyödyntämisen maarakentamisessa ilmoitusmenettelyllä. Asetusta ei sovelleta 1- ja 2-luokan pohjavesialueella, asumiseen tai lasten leikkipaikaksi tarkoitettulla alueella, luonnonsuojelualueeksi osoitetulla alueella, ravintokasvien viljelyyn tarkoitettulla alueella eikä sisämaan tulvavaara-alueella. Asetus rajoittaa myös jätteen kerrospaksuuden sekä mahdolliset käyttökohteet. Käsiteltyä jätteenpolton pohjakuonaa on asetuksen perusteella mahdollisuus käyttää väylä- ja kenttärakenteissa sekä teollisuus- ja varastorakennusten pohjarakenteissa. Jätteen hyödyntäminen ilmoitusmenettelyllä edellyttää myös, että asetuksessa määrätyt haitallisten aineiden liukoisuuksien ja pitoisuuksien raja-arvot eivät ylitä ja laadunhallintaohjeita noudatetaan. Jos asetuksen määrittelemät edellytykset eivät täyty, tarvitaan pohjakuonan hyödyntämiseen ympäristölupa.

Pohjakuonien hyödyntämiseksi maarakentamisessa on ensin arvioitava niiden soveltuvuus ja jalostettavuus eri maarakentamisen sovelluksiin selvittämällä materiaalin tekniset ja ympäristöominaisuudet (Kiviniemi ym. 2012, s. 38). Hyödynnettävien kuonien geotekniset indeksiominaisuudet voidaan määrittää pääsääntöisesti samoilla menetelmillä kuin luonnonkiviainesten ominaisuudet. Jos voimalaitoksella käytettävä polttoaine vaihtelee, on suositeltavaa tehdä jatkuvaa laadunvaihteluseurantaa rakentamisen kannalta tärkeille parametreille, kuten optimivesipitoisuus, maksimikuivairtoisuus, alkuperäinen vesipitoisuus ja puristuslujuus/rasituskestävyys. (Kiviniemi ym. 2012, s. 12)

Väylähankkeissa käytettävältä uusiomateriaalilta vaaditaan joko Väyläviraston yleinen uusiomateriaalihyväksyntä tai hankekohtainen uusiomateriaalihyväksyntä. Hyväksynnässä arvioidaan materiaalin teknistä soveltuvuutta ja sille laadittuja ohjeita. Kun materiaalille on saatu yleinen uusiomateriaalihyväksyntä, sen käytölle ei tarvita erillistä hankekohtaista hyväksyntää. Hyväksyntä on mahdollista saada myös seokselle, esimerkiksi lentotuhkan ja sementin seokselle kantavan kerroksen stabilointiin. (Väylävirasto 2020a, s. 24-25)

### **3.3.1 Pohjakuonan hyödyntäminen tierakenteiden jakavassa kerroksessa**

Liikenneväylien päällysrakenne on useimmiten kerroksellinen. Kerrokset voidaan tehdä luonnonmateriaaleista tai jalostetuista materiaaleista, ja ne voivat olla sitomattomia tai

sidottuja. (Ehrola 1996, s. 13) Sidottujen kerroksien ominaisuuksia on parannettu käyttäen sideainetta, kun taas sitomattomiin kerroksiin ei ole käytetty sideainetta (Matinlauri ym. 2016, s. 16). Rakentaessa kerroksellista päällysrakennetta, voidaan käyttää eri laatuista materiaaleja; alimpiin kerroksiin kelpaa myös heikompi materiaali ja vain ylimpiin kerroksiin tarvitaan korkealaatuista materiaalia (Ehrola 1996, s. 138). Jakavan kerroksen tehtävänä on muodostaa kantava alusta ja jakaa liikennekuorma riittävän laajalle alueelle. Lisäksi jakava kerros kuivattaa tierakennetta katkaisemalla kapillaarisen veden nousun ja johtamalla rakenteeseen suotautuneet vedet tien sivulle. (Ehrola 1996, s. 140)

Pohjakuonan toimimista väylärakentamisessa on kokeiltu muun muassa vt19 Seinäjoen itäisellä ohikulkutiellä. Kyseisessä kohteessa hyödynnettiin pohjakuonasta eroteltua mineraalijaetta kevyen liikenteen väylän jakavassa kerroksessa. Kerroksessa hyödynnettiin yhteensä 1900 tonnia kuonaa ja kerroksen paksuudeksi tuli 700 mm. Urakoitsijan kokemuksen mukaan pohjakuona vastasi rakentamisen kannalta mursketta. Rakenteen kantavuus ei saavuttanut rakentamisen jälkeen tehdyissä mittauksissa tavoitetta, mutta kolmen kuukauden jälkeen tehdyissä mittauksissa kantavuusvaatimukset täyttyivät. Kohteen seurantamittauksien tulokset eivät ole saatavilla. (Harju ym. 2019, s. 60)

Myös muissa pohjoismaissa on hyödynnetty jätteenpolton pohjakuonaa jakavassa kerroksessa. Esimerkiksi Ruotsissa on rakennettu useampia koerakenteita. Kun kuonarakenteita on verrattu vertailurakenteeseen, on havaittu, että kuonakerroksen jäykkyys on pienempi, johtuen todennäköisesti kuonan mursketta pienemmästä raakoosta. Eräässä vanhemmassa kohteessa oli rakentamisen jälkeen havaittu jäykkyyden kasvua, mutta kahdella muulla kuonatiellä samankaltaista muutosta ei ollut havaittu. Syy löytyy todennäköisesti kuonan eri varastointiajoista ennen käyttöönottoa; vanhemmassa kohteessa kuonaa oli varastoitu vain muutamia kuukausia, kun kahdessa muussa kohteessa sitä oli varastoitu puolesta vuodesta kahteen vuoteen. (Arm ym. 2008; Bendz ym. 2006, Matinlaurin ym. 2016, s. 82-86 mukaan) Ruotsissa on tutkittu myös tierakenteessa käytetyn pohjakuonan liukoisuuksia. Kenttäkokeissa havaittiin, että pohjakuonasta liukenevat pääkomponentit olivat alumiini, kromi ja kupari. Helposti liukenevat yhdisteet, kuten typpi ja orgaaniset materiaalit, liukenivat nopeammin peittämättömistä luiskista kuin päällysteen alta. Sillä oliko tie päällystetty asfaltilla vai



murskeella, ei ollut juurikaan vaikutusta suotoveden laatuun. (Lidelöw ja Lagerkvist 2007)

### **3.3.2 Pohjakuonan hyödyntäminen tierakenteiden kantavassa kerroksessa**

Kantava kerros on osa päällysrakennetta ja sijaitsee tierakenteessa kulutuskerroksen alla. Sen tehtävänä on nimensä mukaisesti lisätä kantavuutta. Kerroksen paksuus riippuu muun muassa siihen kohdistuvasta painosta sekä maan routivuudesta. (Destia 2021)

Sitomattomassa kantavassa kerroksessa voidaan käyttää kalliomursketta, soramursketta tai uusiomateriaalia (InfraRYL 2020). Sidotun kerroksen kiviaineksen ja rouheen ominaisuusvaatimukset on esitetty Päällysrakenteen stabilointi -ohjeessa (Tiehallinto 2007). Tien rakenteita ja suunnittelua koskevia ohjeita ja vaatimuksia löytyy InfraRYL:stä, Tierakenteen suunnittelu -ohjeesta sekä Liikenneviraston Tieohjeet-luettelosta. Uusiomateriaaleja koskevia ohjeita löytyy muun muassa Uusiomateriaalien käyttö väylärakentamisessa -ohjeesta. Tässä työssä ei syvennytä teitä koskeviin vaatimuksiin kuin sidotun kerroksen sideaineiden osalta.

Uuma 2 -hankkeen tekemässä selvityksessä on koottu uusiomateriaalien teknisen kelpoisuuden arviointiin liittyviä testausmenetelmiä ja käyttökelpoisuuden kriteerejä. Selvityksessä havaittiin, että osalle vaihtoehtoisista materiaaleista tai käyttökohteista ei ollut asetettu juurikaan vaatimuksia. Muun muassa jätteenpolton pohjakuonalle ei ole juurikaan asetettuja vaatimuksia, kun sitä halutaan hyödyntää sitomattomassa tai sidotussa kantavassa kerroksessa. Selvityksessä ehdotettiin lähtökohdaksi sitä, että uusiomateriaalille asetettujen vaatimusten tulisi olla sama kuin luonnonkiviainekselle, ellei tutkimusten perusteella ole asettaa toisin. (Sjöberg ym. 2016a ja 2016b)

Suomessa pohjakuonan hyödyntämistä kantavassa kerroksessa on kokeiltu Lakeuden Etapin vuonna 2014 rakennuttamalla kuonakentällä. Kentässä hyödynnettiin mineraaliainesseosta muun muassa sitomattomassa kantavassa kerroksessa. Materiaalin hienontumisen takia kohteeseen jouduttiin rakentamaan ylimääräinen kantava kerros murskeesta. (Sormunen 2015) Saatujen tutkimustulosten perusteella pohjakuonaa ei voi suositella käytettäväksi kantavassa kerroksessa. Hienontumista voitaisiin mahdollisesti ehkäistä lisäämällä kerrokseen myös luonnonkiveä tai rakentamalla paksumpi asvalttikerros. Näitä vaihtoehtoja tulee kuitenkin kustannussyistä harkita tarkkaan. (Sormunen ja Kolisoja 2017)

### 3.3.3 Pohjakuonan hyödyntäminen sideaineena tierakenteissa

Tien päällysrakenteita voidaan stabiloida kiviaineksen sekaan sekoitettavan lujittuvan sideaineen avulla. Stabiloinnilla parannetaan kuormituskestävyyttä, korjataan pinnan epätasaisuutta, rakenteen muotoa tai vaurioita sekä vähennetään hienoaineksen routimisherkkyyttä. Sideaineina voidaan käyttää bitumisia tai hydraulisia sideaineita. Bitumistabilointi voidaan tehdä vaahtobitumistabilointina, bitumiemulsiostabilointina tai Remix-stabilointina. (Tiehallinto 2007, s. 9 ja 16) Hydraulisen sideaineen toiminta perustuu veden kanssa tapahtuvaan reaktioon, jossa syntyy sitoutuva ja kovettuva massa (Matinlauri ym. 2016, s. 17). Yleisemmin hydraulisena sideaineena käytetään sementtiä, masuunihiekkaa tai näiden yhdistelmää (Belt ym. 2002, s. 13). Stabiloitujen kerrosten yleiset vaatimukset sekä vaatimukset muun muassa stabilointien koostumukselle ja raaka-aineille löytyvät InfraRYL:stä sekä Päällysrakenteen stabilointi -ohjeesta (Tiehallinto 2007, s. 12).

Kaupallisten sideaineiden tarvetta voidaan vähentää hyödyntämällä lujittuvia uusiomateriaaleja hydraulisen sideaineseoksen seosaineena. Masuunihiekan lisäksi uusiomateriaaleista on hyödynnetty muun muassa lentotuhkaa, kipsiä sekä rikinpoiston lopputuotetta. Yleensä pelkällä uusiomateriaalilla ei saavuteta riittävää alkulujuutta ja rasiskekestävyyttä, vaan lisäksi seokseen tarvitaan kaupallista sideainetta. (Väylävirasto 2020b, s. 12-13)

Jätteenpolton pohjakuonalla stabiloitavalle kantavalle kerrokselle ei löydy suoraan ohjeistusta, mutta sille voidaan soveltuvien osin noudattaa sementtistabiloinnin ohjeita (Harju ym. 2019, s. 110). Kantavan kerroksen sementtistabiloinnissa käytetään yleensä portland-, portlandseos- tai masuunikuonasementtejä eli CEM I, CEM II tai CEM III tyyppisiä sementtejä. Sementin tulee olla standardin SFS-EN 197-1 mukaisesti CE-merkitty. Tarkemmin soveltuvat sementtilaadut löytyvät Päällysrakenteen stabilointi -ohjeesta. (Tiehallinto 2007, s. 28) Standardissa SFS-EN 197-1 on määritelty mekaaniset, fysikaaliset, kemialliset ja säilyvyysvaatimukset eri sementtilaaduille. Esimerkiksi standardilujuusluokan 42,5 sementin puristuslujuuden tulee olla kahden vuorokauden kohdalla (varhaislujuus) suurempi kuin 10 megapascalia (MPa) ja 28 vuorokauden kohdalla (standardilujuus) suurempi kuin 42,5 MPa ja pienempi kuin 62,5 MPa. Lisäksi standardissa on määrätty muun muassa suurin sallittu hehkutushäviö ja sulfaattipitoisuus.

Stabilointimassan koostumuksen suunnitteluun kuuluu suhteitustavoitteiden valinta. Suhteituksen avulla pyritään valitsemaan optimaalinen toimenpide, sideainetyyppi ja massaresepti. Sementtistabilointi suhteitetaan aina kokeellisesti. Stabilointimassan, jolla tarkoitetaan sementin, veden ja stabiloitavan kiviaineksen seosta, tulee täyttää seuraavat vaatimukset: (Tiehallinto 2007, s. 36 ja 38)

- ”puristuslujuus välillä 3–8 MPa (7 päivän iässä),
- puristuslujuus välillä 5–13 MPa (28 päivän iässä),
- jäädytys-sulatuskokeen avulla määritetty pakkasrapautumiskestävyys on vähintään 67 %, näytteiden ikä 28 päivää jäädytys-sulatussykliä alkaessa.”

## 4 KUONAN LUJITTUMISOMINAISUUDET

Itselujittumisella tarkoitetaan sitä, että materiaali reagoi veden kanssa muodostaen samankaltaisia reaktiotuotteita kuin sementin reaktioissa (Illikainen ym. 2014). Maarakentamisessa lujittumisominaisuuksilla tarkoitetaan materiaalin kykyä lujittua, kun sitä kostutetaan ja tiivistetään. Tuhkilla olennaisesti lujittuvuuteen vaikuttaa aktiivisen kalkin (CaO) pitoisuus; mitä korkeampi pitoisuus, sitä korkeampi lujuustaso voidaan saavuttaa. Maarakentamisessa muita lujittumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat oikea vesipitoisuus tiivistyshetkellä, toteutunut tiiveysaste sekä lujittumislämpötila ja -aika. (Kiviniemi ym. 2012, s. 16)

Veden kanssa tapahtuvia reaktioita kutsutaan hydrataatioreaktioiksi. Esimerkiksi sementin kovettuminen on seurausta hydrataatioreaktiosta, jossa vedetön yhdiste reagoi veden kanssa muodostaen hydraatin. Sementillä reaktio aiheuttaa sekä kemiallisia, että fysikaalismekaanisia muutoksia, erityisesti sitoutumista ja kovettumista. (Odler 1998, s. 241). Vastaavia hydrataatioreaktioita tapahtuu myös kuonilla ja tuhkilla. Tässä kappaleessa käydään ensin läpi sementin hydrataatio, jonka jälkeen käydään läpi pohjakuonan lujittuminen itsestään, sementin seosaineena sekä alkaliaktivoidussa materiaalissa. Lopuksi kerrotaan vielä lyhyesti lujittumiseen vaikuttavista tekijöistä.

### 4.1 Sementin hydrataatio

Portlandsementti on käytetyin sementti (Virola ja Raivio 2000, s. 8). Portlandsementtiklinkkeri koostumus on yleensä 67 % CaO, 22 % SiO<sub>2</sub>, 5 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ja 3 % muita aineosia (Taylor 1997, s. 1). Kuten kappaleessa 2.2.2 havaittiin, myös jätteenpolton pohjakuona sisältää suurimpina pitoisuuksina samoja yhdisteitä. Sementin neljä tärkeintä faasia ovat aliitti, beliitti, aluminaatti ja ferriitti. Näistä aliitti on kaikista tärkein. Aliitti on trikalsiumsilikaattia (Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>) ja se reagoi nopeasti veden kanssa, ollen näin tärkein faasi lujuudenkehityksen kannalta. (Taylor 1997, s. 1)

Portlandsementin hydrataatio on monimutkainen prosessi sisältäen useita kemiallisia reaktioita klinkkerien, kalsiumsulfaatin ja veden välillä. Hydrataatioreaktion seurauksena päätuote portlandsementissä on C-S-H faasi. C-S-H faasilla tarkoitetaan amorfista tai lähes amorfista kalsiumsilikaattihydraattituotetta, jonka yleinen kaava on CaO<sub>x</sub> \* SiO<sub>2</sub> \* H<sub>2</sub>O<sub>y</sub>. Sekä x ja y voivat vaihdella laajalla alueella. Toiseksi suurin tuote

portlandsementissä on portlandiitti eli kiteinen kalsiumhydroksidi. (Odler 1998, s. 241, 249, 263 ja 274)

## 4.2 Lujittuminen itsestään

Jätteenpolton pohjakuonan lujuuteen voi vaikuttaa useat reaktiot, kuten kalsiumin hydrataatio, karbonoituminen, C-S-H faasien muodostuminen, kidevedettömän kalsiumsulfaatin hydrataatio bassaniitiksi ja kipsiksi (kalsiumsulfaattidihydraatti), alumiinin hydrataatio sekä ettringiitin muodostuminen. Ettringiitti aiheuttaa materiaalin lujittumista niin kauan kun saatavilla on tarpeeksi huokostilaa. Jos huokostilaa ei ole tarpeeksi, ettringiitin muodostumisesta aiheutuva tilavuuden kasvu rikkoo matriisin ja johtaa muun muassa rakenteen murtumiseen ja lujuuden menettämiseen. (Ott ja Kempfert 2003)

An ym. (2017) tutkivat hydratoituneen pohjakuonan ominaisuuksia. Ennen hydrataatiota pohjakuonassa oli suurimpina pitoisuuksina kvartsia ( $\text{SiO}_2$ ), kalsiittia ( $\text{CaCO}_3$ ), kalsiumsulfaattia ( $\text{CaSO}_4$ ), trikalsiumaluminaattia ( $\text{C}_3\text{A}$ ) sekä portlandiittia ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Hydrataation jälkeen kuonaan oli muodostunut ettringiittiä ja kipsiä. Tutkimuksessa huomattiin myös, että pelkkää pohjakuonaa sisältävän näytteen sitoutumisen alkamisaika oli nopeampi kuin pelkkää sementtiä sisältävän näytteen. Tämä on selitettävissä trikalsiumaluminaatin nopealla reaktiolla veden kanssa. Toinen selittävä mekanismi on bassaniitin reagoiminen veden kanssa muodostaen kipsiä. Bassaniitin luonteeseen kuuluu nopea alkusitoutuminen. Verrattuna sementin lujuuteen, pelkkää pohjakuonaa sisältävä näyte saavutti 10 % sementin lujuudesta.

## 4.3 Sementin seosaineena

Pohjakuona sisältää samoja yhdisteitä kuin portlandsementti ja näin ollen se on potentiaallinen aine käytettäväksi sementin raaka-aineena (Li ym. 2016). Lin ja Lin (2006) tekemässä tutkimuksessa tutkittiin jätteenpolton pohjakuonasta ja sementistä valmistetun seoksen pozzolaanisia reaktioita ja teknisiä ominaisuuksia. Pohjakuona käsiteltiin tutkimusta varten ensin sulattamalla  $1400\text{ }^\circ\text{C}$ :seen, sen jälkeen karkaisemalla vedessä ja jauhamalla kuulamyyllyssä, kunnes saatiin aikaiseksi hienojakoinen kuona. Näytekappaleet valmistettiin sementistä, vaihtelevasta määrästä kuonaa ja vedestä. Tutkimuksessa tehdyissä termisissä analyyseissa havaittiin, että näytteissä olevat

hydraatit olivat pääosin portlandiittia ja C-S-H geeliä, eli samoja yhdisteitä, joita löytyy perinteisestä portlandsementistä. Tutkimuksessa havaittiin myös, että pohjakuona reagoi kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen C-S-H geelin. Lujuuskehitystä tutkittaessa havaittiin, että ensin pohjakuona alensi lujuutta. Tämän arveltiin johtuvan kuonassa tapahtuvista reaktioista, jotka kuluttivat osan kalsiumhydroksidista, jota oli syntynyt aikaisemmissa hydrataation vaiheissa. Myöhemmissä vaiheissa (28-90 päivän kuluttua) 10 ja 20 % pohjakuonaa sisältävät näytteet saavuttivat lähes saman lujuuden kuin pelkkää sementtiä sisältänyt näyte. Pohjakuona aktivoitui portlandsementtiklinkkerien hydrataatiossa syntyneestä kalsiumhydroksidista.

Myös An ym. (2017) ovat tutkineet pohjakuonaa sementin seosaineena. Tutkimuksessa havaittiin, että pohjakuonan lisäys myöhästytti sekä sitoutumisen alkamis- että päättymisaikaa. Yhtenä syynä tälle ehdotettiin olevan se, että kun pohjakuonan pitoisuus nousi, väheni hydratoimattoman sementin määrä ja siten kalsiumsilikaattihydraatin määrä. Tutkimuksessa huomattiin myös selkeä tiheyden lasku suhteessa lisätyn pohjakuonan määrään. Yksi selittävä syy tälle voi olla alumiinihydroksidin ja vetykaasun muodostuminen, joka johtuu pohjakuonassa olevan metallisen alumiinin reagoidessa korkeassa pH:ssa. Vetykaasu voi muodostaa kuplia, joka johtaa näytteen tilavuuden kasvuun ja näin ollen tiheys laskee. Lujuuskokeissa näyte, joka sisälsi 20 % pohjakuonaa pääsi lähimmäksi sementistä tehtyä kontrollinäytettä.

#### 4.4 Alkaliaktivoitua materiaalia

Alkaliaktivaattorit ovat vahvoja emäksisiä liuoksia, kuten natriumhydroksidia (NaOH), kaliumhydroksidia (KOH) tai natriumsilikaattia ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). Alkaliaktivaattorit voivat reagoida alumiini- ja silikaattipitoisten materiaalien kanssa muodostaen kiinteän epäorgaanisen polymeerin, alkaliaktivoitua materiaalia. Tämän materiaalin ominaisuudet ovat lähellä hydratoitua sementtiä. Lähtöaineen kemiallisella koostumuksella on suuri vaikutus muodostuvan alkaliaktivoitua materiaalin toimintaan. (Kurda ym. 2020)

Kun kalsiumrikasta lähtöainetta aktivoidaan alkaliaktivaattorilla, pääreaktiotuote on kalsiumsilikaattipohjainen hydraatti, esimerkiksi C-(A)-S-H geeli. Alkaliaktivoitua materiaalia C-(A)-S-H geeli voi myös esiintyä samanaikaisesti natriumaluminosilikaattihydraatti (N-A-S-H) geelin kanssa. (Zhu ym. 2018) Kun

molemmat mainitut geelit esiintyvät yhdessä, se yleensä parantaa lopputuotteen lujuutta (Zhuang ym. 2016).

Cristelo ym. (2020) tutkivat pohjakuonan ominaisuuksia, kun aktivaattorina käytettiin natriumsilikaattia ja natriumhydroksidia. Tutkimuksessa havaittiin, että yksiaksiaalisen puristuslujuuden tulokset olivat parhaimmat pohjakuonan ja natriumsilikaatin seoksella. Tutkimuksessa käytettiin tulosten vertailuun näytteitä, jotka sisälsivät pohjakuonaa, sementtiä ja vettä. Tutkimuksessa havaittiin, että 30 % sementtiä sisältävän näytteen lujuustulokset olivat samaa luokkaa seoksen kanssa, jossa oli käytetty aktivaattorina 4 mol/kg vahvuista natriumhydroksidia. Tämän perusteella aktivaattorin käyttäminen voisi olla taloudellisesti kilpailukykyinen ratkaisu sementin tilalle. Mineralogisessa tutkimuksessa havaittiin vain vähäisiä muutoksia alkuperäisen pohjakuonan ja pohjakuonan ja natriumhydroksidin seoksen välillä. Suurin osa faaseista, kuten kalsiitti, kvartsi ja oligoklaasi pysyivät mututumattomina, osoittaen että ne eivät osallistuneet alkalireaktioihin. Tuloksissa havaittiin kuitenkin pientä kasvua amorfisen aineen läsnäolossa, joka selittyy amorfisen alumosilikaatti geelin muodostumisella.

#### **4.5 Lujittumiseen vaikuttavat ominaisuudet**

Kuonien lujittumiseen vaikuttavat reaktiot ovat riippuvaisia veden ja ilman saatavuudesta, mukana olevista aineista sekä sitoutumisajasta (Ott ja Kempfert 2003). Kuonien reaktiivisuuteen vaikuttaa muun maussa kalkin ja piioksidin määrä sekä palamattoman hiilen ja esimerkiksi lyijyn ja sinkin määrä. Pozzolaanisia reaktioita varten kuonassa täytyy olla tarpeeksi vapaata kalkkia ja piioksidia. Palamaton hiili, lyijy ja sinkki sen sijaan hidastavat pozzolaanisia reaktioita. (Ribbing 2007) Suurempi ominaispinta-ala lisää kuonien reaktiivisuutta (Sarkkinen ym. 2015). Alkaliaktiivoinnissa lujittumiseen vaikuttaa reaktiivisten faasien  $\text{SiO}_2$  ja  $\text{Al}_2\text{O}_3$  saatavuus (Maldonado-Alameda ym. 2020b).

## 5 TUTKITTAVA KUONA JA TUTKIMUSMENETELMÄT

### 5.1 Tutkittavat pohjakuonat

Tässä työssä tutkittiin Fortum Waste Solutions Oy:n keräämää jätteenpolton pohjakuonaa. Pohjakuona tuli Ruotsista, jossa se on syntynyt arinapoltossa. Polton jälkeen kuona on mennyt vesilukon läpi ja näin ollen ollut vedellä kylläinen. Pohjakuona on varastoitu ulkona kasalla, jossa se on ollut kolmesta kahteentoista kuukautta. Näytteenä saadun kuonan varastointiaikaa ei voida tarkemmin määrittää, mutta keskimäärin kuona on ollut kasalla kuusi kuukautta. Varastoinnin jälkeen kuonaa on käsitelty ”kolistelemalla” niin, että kuonasta on saatu eroteltua metallit. Tutkittava näytemateriaali on kerätty suoraan metallinerotusprosessista ilman muuta käsittelyä.

### 5.2 Kuonien valmistelu

Kuonanäytteitä saapui yhteensä neljä 10 litran ämpäriä, joista kaksi sisälsi hienojaetta (raekoko 0–1,7 mm) ja kaksi karkeaa jaetta (raekoko 1,7–13 mm). Ämpärit painoivat noin 10–12 kg per ämpäri. Kuvassa 6 on esitetty saapuneet kuonat.



Kuva 6. Saapuneet kuonanäytteet. Hieno pohjakuona vasemmalla ja karkea pohjakuona oikealla.

Hienojaeämpärit yhdistettiin keskenään ja karkeajaeämpärit keskenään käyttäen metallista näytteenjakajaa. Samalla tehtiin pienempiä, noin kahden kilon painoisia



osanäytteitä muovipusseihin. Ennen kokeiden tekemistä materiaalit kuivattiin uunissa ja jauhettiin kuulamyllyssä (jauhatusaika yksi tunti). Kaikki kokeet on tehty kuivatulle ja jauhetulle materiaalille, ellei ole toisin ilmoitettu.

### **5.3 Kuonan ominaisuuksien määrittely**

#### **5.3.1 Partikkelikokojakauma**

Partikkelikokojakauma määritettiin karkealle ja hienolle jakeelle. Analysointiin käytettiin Beckman Coulter LS 13 320 laitteistoa. Ajot suoritettiin isopropanoliliuoksessa. Kuonaa sekoitettiin 100 millilitraan isopropanolia, jolloin muodostui noin 0,6 % liuos. Liuos käytettiin ultraäänipesurissa saostumien hajottamiseksi. Tämän jälkeen noin 3 millilitraa näytettä pipetoitiin laitteeseen. Laitteisto mittaa partikkelikokojakauman mittaamalla partikkelien sirottaman valon mallin. Jokaisen partikkelin sirontakuvio on ominainen sen koolle.

#### **5.3.2 Tiheys ja hehkutushäviö**

Molempien jakeiden tiheys määriteltiin Micromeritics AccuPyc II 1340 - kaasupyknometrillä. Tiheys mitattiin sekä alkuperäisille kuonille, että jauhetuille kuonille. Ennen analyysiä kuonia kuivattiin uunissa 105 °C:ssa 16 tunnin ajan. Tämän jälkeen näytettä punnittiin 10 millilitran näyteastiaan niin, että näytettä oli vähintään yksi millilitra. Punnitustulos otettiin ylös, jonka jälkeen näyteastia asetettiin laitteistoon ja näytteen massa syötettiin laitteeseen. Laite huuhtelee näytettä heliumilla, joka jälkeen se suorittaa viisi mittausta. Jokaiselle kuonalaadulle analyysi suoritettiin kaksi kertaa. Kaasupyknometrin toiminta perustuu kaasun syrjäyttämisperiaatteeseen, jonka perusteella saadaan näytteen tilavuus. Kun näytteen massa tiedetään, saadaan laskettua näytteen tiheys.

Hehkutushäviö (LOI, loss on ignition) mitattiin Precisa prepASH 129 -laitteistolla. Sopiva määrä näytettä laitettiin upokkaisiin, jotka asetettiin laitteiston sisään. Laitteisto lämmittää näytteen ensin 100 °C:een, jossa lämpötila pysyy vakiona neljän tunnin ajan. Tämän jälkeen lämpötila nousee nopeudella 200 °C/h 525 °C:een, jossa lämpötila pysyy vakiona kolmen tunnin ajan. Tämän jälkeen lämpötila nousee nopeammalla vauhdilla 950 °C:een, jossa se pysyy taas vakiona kolmen tunnin ajan. Hehkutushäviöstä jopa 60 % on orgaanista hiiltä ja loput karbonaatteja ja tiiviisti sitoutunutta vettä (Chandler ym. 1997,

s. 347) Hehkutushäviöarvot riippuvat muun muassa polttoprosessista ja sen tehokkuudesta. Korkea arvo viittaa huonoon polttoprosessiin. (Izquierdo ym. 2001)

### 5.3.3 Kemiallinen koostumus

Kemiallinen koostumus mitattiin röntgenfluoresenssilaitteella (XRF, PANalytical Axios MAX) ja tulokset analysoitiin Omnia-ohjelmistolla. Näyte, joka oli peräisin hehkutushäviön mittauksesta, ensin jauhettiin, jonka jälkeen näytteestä valmistettiin sulatenappi. Sulatenappi valmistettiin punnitsemalla 0,9 grammaa kuonaa ja sekoittamalla se 9 grammaan seosta, joka sisälsi suhteessa 66:34 litium tetraboraattia ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) ja litium metaboraattia ( $\text{LiBO}_2$ ). Tätä seosta kuumennettiin  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ :ssa, jonka seurauksena syntynyt sulatenappi analysoitiin XRF-laitteella. XRF-analyysissä mitataan näytteen fluoresoiva röntgensäde, kun sitä viritetään primaarilla röntgenlähteellä. Jokainen näytteen alkuaineista tuottaa joukon itselleen tyypillisiä fluoresoivia röntgensäteitä.

### 5.3.4 Mineraloginen koostumus

Analyysia varten näyte valmistettiin punnitsemalla 0,9 g kuonaa ja 0,1 g titaanidioksidia ( $\text{TiO}_2$ ) ja sekoittamalla nämä huolellisesti keskenään morttelissa. Näyte analysoitiin röntgendifraktometrillä (XRD). Mittaukset tehtiin Rigaku Smartlab 9 kW röntgendifraktometrillä ja tulokset analysoitiin PDXL2-ohjelmistolla. Laitteen pyörivä anodi on kobolttia. Cross Beam optiikasta käytössä oli Bragg-Brentano (BB) optiikka. Tarkemmat mittaussparametrit on esitetty liitteessä 1.

### 5.3.5 Termogravimetrinen analyysi

Termogravimetrinen analyysi (TGA) avulla oli tarkoitus selvittää, kuinka paljon reaktio kuluttaa kalsiumhydroksidia ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) tai sementtiä. Analyysiä varten valmistettiin näytteet sekä hienosta että karkeasta jakeesta. Molemmista jakeista tehtiin näytteet sekä sementin että kalsiumhydroksidin kanssa. Näytteet valmistettiin sekoittamalla 10 grammaa kuonaa, 30 grammaa kalsiumhydroksidia tai sementtiä sekä 80 grammaa vettä. Näytteet tehtiin purkkeihin, suljettiin ja asetettiin tärylaitteeseen, jonka tarkoituksena oli sekoittaa näytteet. Näytteet olivat sekoittajassa kahdeksan päivää. Sementtiä sisältävät näytteet olivat kovettuneet, eikä niistä näin ollen saanut edustavaa näytettä.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -näytteet sekoitettiin hyvin, jonka jälkeen seosta kaadettiin muoviseen muottiin. Seoksia kuivattiin vuorokauden ajan  $60\text{ }^\circ\text{C}$  uunissa, jonka jälkeen ne murskattiin vasaralla. Pieni

määrä molempia näytteitä (hieno pohjakuona +  $(\text{Ca}(\text{OH})_2$  ja karkea pohjakuona +  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) otettiin analysoitavaksi. Lisäksi analysoitiin hieno ja karkea pohjakuona ilman sideaineen lisäystä.

TGA-analyysi suoritettiin TA Instruments SDT 650 -laitteistolla ja tulokset analysoitiin Trios-ohjelmistolla. Laitteisto käytti kaasuna typpi 5.0:aa. Pieni määrä näytettä asetettiin laitteistoon, jonka jälkeen laite ensin lämpeä 40 °C:een. Tämä lämpötila pysyi 60 minuutin ajan, jonka jälkeen lämpötila nousi nopeudella 5 °C/min aina 1005 °C:een.

Jotta veden, kalsiumhydroksidin ja kalsiumkarbonaatin määrät saadaan selville, on ensin tiedettävä, missä lämpötiloissa ne haihtuvat tai hajoavat. Kalsiumhydroksidin hajoamisen reaktioyhtälö on:



Kalsiumkarbonaatin hajoamisen yhtälö on:



Kirjallisuudessa löytyy useita lämpötilavälejä, jolla hajoamisreaktioita on havaittu. Lämpötilat vaihtelevat kalsiumhydroksidin hajoamiselle 300 ja 580 °C välillä ja kalsiumkarbonaatin hajoamiselle 500 ja 1007 °C välillä (El-Jazairi ja Illston 1977; Kariya ym. 2016; Khachani ym. 2014; Kim ja Olek 2012). Tässä työssä on kirjallisuuden ja saatujen tulosten perusteella valittu hajoamislämpötilaksi 350–450 °C kalsiumhydroksidille ja 600–700 °C kalsiumkarbonaatille. Vesi haihtuu 100–200 °C:ssa.

Kalsiumhydroksidin ja kalsiumkarbonaatin määrää tarkasteltiin laskemalla yhdisteiden ainemäärät ja massat. Ainemäärät ja massat laskettiin kaavalla:

$$n = \frac{m}{M} \quad (3)$$

missä       $n$  on ainemäärä (mol)  
                $m$  on massa (g) ja  
                $M$  on moolimassa (g/mol).

### 5.3.6 Liukoisuusominaisuudet

Liukoisuusominaisuudet määriteltiin standardin SFS-EN 12457-2 mukaisella 1-vaiheisella ravistelutestillä. Neste/kiinteä -suhde oli 10 l/kg. Standardista poiketen liukoisuustestit tehtiin 10 grammalla näytettä.

## 5.4 Koekappaletutkimukset

Koekappaletutkimukset olivat kaksivaiheiset. Ensimmäisessä vaiheessa valmistettiin koekappaleet sekä hienosta, että karkeasta kuonasta. Taulukossa 3 on esitetty reseptiikka tehdyille sekoituksille. Ensimmäisen vaiheen tarkoituksena oli selvittää, kumpi kuonajae toimisi paremmin sideaineena.

Näytteet valmistettiin sekoittamalla kuonaa, sideainetta ja vettä astiassa, jonka jälkeen massaa laitettiin muotteihin. Muotit olivat muovisia, sylinterin mallisia ja halkaisijaltaan 25 mm. Muottien korkeus oli noin 26 mm. Mahdolliset ilmakuplat poistettiin täryyttämällä muotteja, jonka jälkeen pinta tasoitettiin. Jokaisesta seoksesta saatiin yhteensä kolme näytekappaletta. Valmiit näytteet asetettiin kosteuskammioon, jonka lämpötila oli 25 °C ja kosteus 98 %.

Taulukko 3. Koekappaletutkimuksen ensimmäisen vaiheen reseptiikka.

Näytteen nimi	Karkea kuona [g]	Hieno kuona [g]	Ca(OH) <sub>2</sub> [g]	Sementti [g]	Vesi [g]	Vesi/kiinteä -suhde
CCa10	60		6		26,4	0,4
CCe10	60			6	26,4	0,4
FCa10		60	6		26,4	0,4
FCe10		60		6	26,4	0,4

Toisessa vaiheessa edettiin ensimmäisen vaiheen tulosten perusteella ja valmistettiin näytteitä hienosta kuonasta eri kalsiumhydroksidin ja sementin lisäyksillä. Toisen vaiheen reseptiikka on esitetty taulukossa 4. Yhdestä reseptiikan perusteella tehdystä sekoituksesta saatiin yhteensä kolme koekappaletta. Jokaisesta seoksesta valmistettiin yhteensä yhdeksän koekappaletta. Seokset valmistettiin samalla tavalla kuin ensimmäisessä vaiheessa ja valmiit näytteet asetettiin kosteuskammioon. Kuvassa 7 on koekappaleita muoteissa sekä muotista poiston jälkeen.

Taulukko 4. Koekappaletutkimuksen toisen vaiheen reseptiikka.

Näytteen nimi	Hieno kuona [g]	Ca(OH) <sub>2</sub> [g]	Sementti [g]	Vesi [g]	Vesi/kiinteä -suhde
FCa2	60	1,2		24,48	0,4
FCa4	60	2,4		24,96	0,4
FCa6	60	3,6		25,44	0,4
FCa8	60	4,8		25,92	0,4
FCa10	60	6		26,4	0,4
FCe2	60		1,2	24,48	0,4
FCe4	60		2,4	24,96	0,4
FCe6	60		3,6	25,44	0,4
FCe8	60		4,8	25,92	0,4
FCe10	60		6	26,4	0,4



Kuva 7. Toisen vaiheen hieno pohjakuona + 10 % Ca(OH)<sub>2</sub> koekappaleet muoteissa ja muoteista poiston jälkeen.

#### 5.4.1 Puristuslujuus

Puristuslujuus mitattiin Zwick / Roell Z010 -laitteistolla ja ohjelmistoa testXpert II apuna käyttäen. Ennen mittauksia mitattiin jokaisen näytteen korkeus ja halkaisija. Nämä tiedot syötettiin ohjelmistoon. Näyte asetettiin laitteen levyjen väliin suljettavassa muovipussissa sotkeentumisen ehkäisemiseksi. Koe oli sijaintiohjattu ja kokeen nopeus oli 3 mm/min. Koe lopetettiin, kun näytekappale hajosi tai muutti huomattavasti

muotoaan. Ohjelmiston antamasta taulukosta luettiin  $F_{\max}$ -arvo, joka oli kokeen aikana saavutetun puristuslujuuden arvo Megapascalina (MPa). Kuvassa 8 on esitetty koelaitteisto.



Kuva 8. Puristuslujuuden määrittämiseen käytetty laitteisto ja näytteen asettelu koetilanteessa.

Ensimmäisessä vaiheessa puristuslujuus tehtiin toisena päivänä näytteiden valmistuksesta. Lujuusmittaus tehtiin kahdelle näytteelle per sekoitus. Toisessa vaiheessa lujuusmittaukset tehtiin kolmantena ja seitsemäntenä päivänä. Molempina päivinä mittaukset tehtiin kolmelle näytteelle per sekoitus.

#### 5.4.2 Veden imeytyminen

Ensimmäisessä vaiheessa näytekappaleista tutkittiin vain, kuinka ne kestävät vedessä oloa. Yksi kappale jokaista sekoitusta asetettiin hanavedellä täytettyyn astiaan. Näytekappaleet olivat vedessä vuorokauden, jonka jälkeen kokeiltiin, kuinka helposti kappaleet rikkoontuvat.

Toisessa vaiheessa mitattiin veden absorptio näytteille, jotka olivat kovettuneet seitsemän päivää. Jokaisesta seoksesta kolme näytekappaletta asetettiin veteen. 24 tunnin jälkeen näytteistä otettiin märkäpainot, jonka jälkeen näytteet vietiin uuniin, jossa niitä kuivattiin

105 °C:ssa 24 tunnin ajan. Tämän jälkeen näytteistä otettiin kuivapainot. Veden absorptio laskettiin kaavalla:

$$\text{Veden absorptio (\%)} = 100 \% \cdot \frac{(\text{Märkápaino} - \text{Kuivapaino})}{\text{Kuivapaino}} \quad (4)$$

### 5.4.3 Mineraloginen koostumus ja liukoisuusominaisuudet

XRD- ja liukoisuusominaisuusanalyysi tehtiin koekappaleille, joille oli tehty lujuusmittaukset seitsemäntenä päivänä. Koekappaleista valittiin näytteet, joihin oli lisätty 2, 6 ja 10 % kalsiumhydroksidia sekä 6 ja 10 % sementtiä. Ennen kokeita reaktiot pysäytettiin 2-propanolin (isopropanoli) avulla, koska koekappaleita oli valmistettu eri päivinä. Näin varmistettiin, että reaktiot olivat olleet käynnissä jokaisessa kappaleessa yhtä kauan ennen analyysien tekoa. Kappaleiden reaktiot pysäytettiin 30 päivän kuluttua niiden valmistuksesta. Kappaleet olivat ensin 4–5 päivää isopropanolissa, jonka jälkeen isopropanoli valutettiin pois ja näytteet saivat kuivua vuorokauden ajan vetokaapissa. Tämän jälkeen koekappaleet murskattiin vasaralla ja samaa koostumusta olevat jauheet yhdistettiin keskenään.

Koekappaleiden XRD-näytteet valmisteltiin ja analysoitiin samalla tavalla kuin paljaat kuonat. Myös liukoisuusominaisuudet määriteltiin samalla tavalla kuin paljaalle pohjakuonalle.

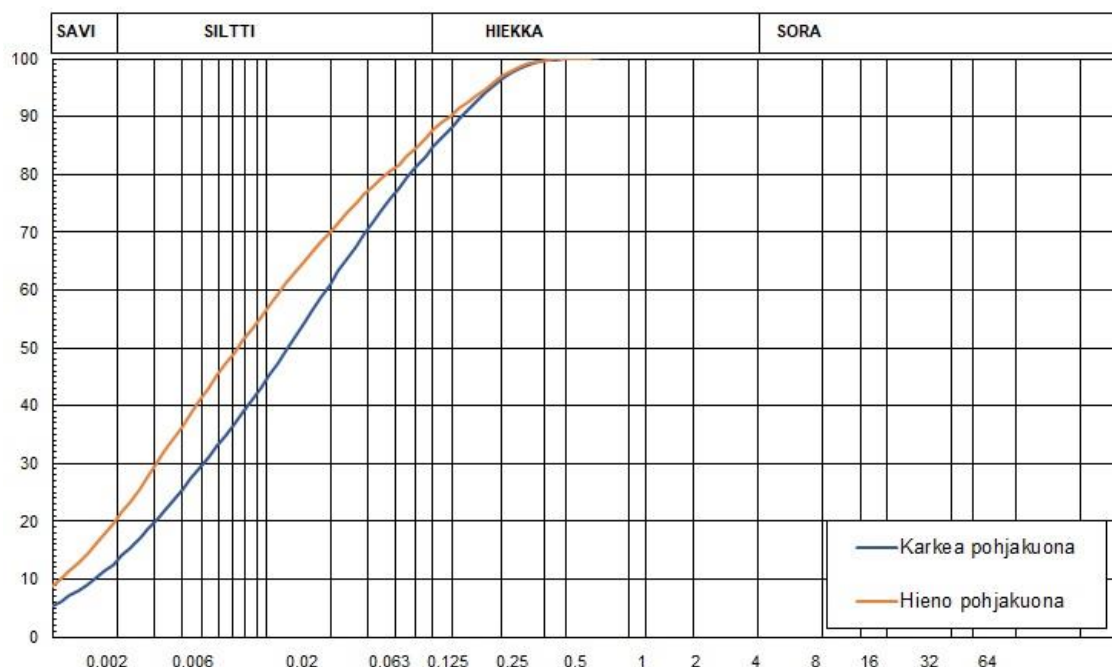
## 6 TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

### 6.1 Kuonien ominaisuudet

#### 6.1.1 Partikkelikokojakauma

Karkean pohjakuonan partikkelikoon keskiarvo oli  $27,1 \mu\text{m}$  ja mediaaniarvo  $12,0 \mu\text{m}$ . Hienon pohjakuonan partikkelikoon keskiarvo oli  $22,3 \mu\text{m}$  ja mediaaniarvo  $7,0 \mu\text{m}$ . Liitteessä 2 on esitetty partikkelikokojakaumakuvaajat. Kuvassa 9 on esitetty karkean ja hienon pohjakuonan partikkelikoko puolilogaritmisessa kuvaajassa.

Molemmat jakeet jauhettiin ennen partikkelikoon mittausta, joten ne olivat erittäin hienojakoisia. Molempien jakeiden partikkelikoko oli pääasiassa saven ja siltin kokoluokassa, eli molemmat jakeet ovat geotekniseltä luokitukseltaan savista silttiä. Tämän perusteella molemmat jakeet ovat liian hienojakoisia käytettäväksi sellaisenaan luonnonkiviaineksen korvikkeena tierakenteisessa. Alkuperäisen kuonan soveltuvuutta ei voida tässä työssä arvioida, sillä partikkelikokojakaumaa ei mitattu alkuperäiselle materiaalille.



Kuva 9. Hienonnetun karkean ja hienon pohjakuonan partikkelikokojakauma puolilogaritmisessa kuvaajassa.



### 6.1.2 Tiheys ja hehkutushäviö

Tutkitun pohjakuonan tiheys vaihteli välillä 2770–2810 kg/m<sup>3</sup>. Karkean kuonan tiheys oli hieman suurempi kuin hienon kuonan ja molemmissa jakeissa jauhetun kuonan tiheys oli suurempi kuin alkuperäisen kuonan. Tuloksissa ei kuitenkaan ole suurta eroa, vaan tiheydet ovat samaa suuruusluokkaa. Saadut tulokset ovat hiukan suurempia kuin mitä tämän työn kirjallisuussosiassa selvitettyt arvot. Luonnonkiviainesten tiheys on tyypillisesti 2650–2700 kg/m<sup>3</sup> (Izquierdo ym. 2001), joten tutkitun pohjakuonan arvot ovat samaa suuruusluokkaa luonnonkiviainesten tiheyden kanssa. Taulukossa 5 on esitetty tiheysmittauksen keskiarvotulokset sekä alkuperäisille kuonille että jauhetulle kuonille. Tarkemmat mittaustulokset löytyvät liitteestä 3.

Taulukko 5. Karkean ja hienon pohjakuonan tiheys.

	Karkea (alkup.)	Karkea (jauhettu)	Hieno (alkup.)	Hieno (jauhettu)
Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	2770,0	2809,8	2764,8	2776,2

Taulukossa 6 on esitetty karkean ja hienon pohjakuonan hehkutushäviötulokset. Karkean pohjakuonan hehkutushäviö 525 °C:ssa oli 3,3 % ja 950 °C:ssa 4,1 %. Hienon kuonan vastaavat arvot olivat 7,6 % ja 10,4 %. Karkealla jakeella hehkutushäviöarvot ovat huomattavasti pienemmät kuin hienolla jakeella. Hienon jakeen korkeat arvot viittaavat siihen, että jakeessa voi olla paljon palamatonta tai orgaanista materiaalia. Huomioitavaa kuitenkin on, että korkeammissa lämpötiloissa hehkutushäviö voi yliarvioida orgaanisen aineksen määrän johtuen epäorgaanisten aineiden kalsinoinnista samoissa lämpötiloissa (Lynn ym. 2017).

Taulukko 6. Hehkutushäviö (LOI) karkealle ja hienolle pohjakuonalle 525 °C:ssa ja 950 °C:ssa.

	LOI 525 °C [%]	LOI 950 °C [%]
Karkea kuona	3,3	4,1
Hieno kuona	7,6	10,4

### 6.1.3 Kemiallinen koostumus

Tutkitun materiaalin kemiallinen koostumus oksideina esitettynä on taulukossa 7 ja kuonissa esiintyneet alkuaineet ovat liitteessä 4. Alkuaineista suurimpina osuuksina (yli

10 %) esiintyi molemmissa jakeissa happea, piitä ja kalsiumia. Tämän lisäksi rautaa, alumiinia, natriumia ja magnesiumia esiintyi molemmissa jakeissa yli prosentin verran. Hienossa pohjakuonassa myös rikkiä esiintyi yli prosentin verran.

Oksideina esitettynä molemmissa kuonissa oli suurimpana pitoisuutena piioksidia ( $\text{SiO}_2$ ), seuraavaksi eniten kalsiumoksidia, rauta(III)oksidia, alumiinioksidia sekä natriumoksidia. Huomioitavaa on, että XRF-tulokset eivät kerro sisältävätkö kuonat oikeasti juuri näitä yhdisteitä. Tulokset ovat samankaltaisia kuin kirjallisuudessa esitetyt (Chandler ym. 1997, s. 379; Qiao ym. 2008; Speiser ym. 2000). Lisäksi huomion arvoista on, että piitä esiintyi enemmän karkeassa jakeessa, kun taas kalsiumia esiintyi enemmän hienossa jakeessa. Myös tämä havainto on linjassa kirjallisuudesta saataviin tietoihin.

Taulukko 7. Pohjakuonien kemiallinen koostumus oksideina esitettynä. Tulokset massaprosentteina (%).

	Karkea kuona	Hieno kuona
Na <sub>2</sub> O	5,5	3,9
MgO	2,0	1,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,9	10,5
SiO <sub>2</sub>	43,8	33,4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,0	1,5
SO <sub>3</sub>	1,4	2,6
Cl	0,2	0,3
K <sub>2</sub> O	1,2	1,0
CaO	15,3	18,3
TiO <sub>2</sub>	1,0	1,2
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1	0,1
MnO	0,2	0,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,6	12,2
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,008	0,01
NiO	0,04	0,05
CuO	0,6	0,4
ZnO	0,4	0,7
Rb <sub>2</sub> O	0,008	n/a
SrO	0,04	0,04
ZrO <sub>2</sub>	0,04	0,03
BaO	0,2	0,2
PbO	0,1	0,04
SeO <sub>2</sub>	0,003	n/a
SnO <sub>2</sub>	0,04	n/a

#### 6.1.4 Mineraloginen koostumus

XRD-analyysin perusteella karkeassa kuonassa oli kvartsia, ksonotliittia, rautaoksidia sekä meliitteihin kuuluvaa mineraalia (*akeramnite*). Hienossa kuonassa oli meliittia lukuun ottamatta samoja faaseja, ja lisäksi myös kalsiittia ja kipsiä. Molemmissa jakeissa oli yli 60 % tuntematonta materiaalia, joka on todennäköisesti amorfista ainetta. Molemmista jakeista löytyi siis kvartsia, joka on myös kirjallisuuden mukaan yksi

yleisimmistä faaseista. Kalsiittia, joka kirjallisuuden perusteella on toinen yleinen faasi, havaittiin vain hienossa jakeessa. Liitteestä 5 ja 6 löytyy molempien jakeiden XRD-analyysien tulokset.

### 6.1.5 Termogravimetrinen analyysi

Taulukossa 8 ja kuvassa 10 on esitetty prosentteina näytteiden sisältämän veden, kalsiumhydroksidin ja kalsiumkarbonaatin määrä. Laskuissa käytetyt tarkat arvot on saatu analyysin tuottamasta datasta. Esimerkkilaskuna on esitetty paljaan hienon pohjakuonan arvojen laskeminen. Muiden näytteiden arvot on laskettu samalla tavalla.

Veden määrä saatiin laskemalla painon muutos 100 ja 200 °C välillä. Datasta saatiin painoprosentin arvoksi 100 °C:ssa 98,71 ja 200 °C:ssa 96,873. Näin ollen veden määrä näytteessä oli:

$$98,71 \% - 96,873 \% = 1,837 \%$$

Kalsiumhydroksidin hajoamisen lämpötiloissa painoprosenttiarvot olivat 350 °C:ssa 94,816 ja 450 °C:ssa 93,555. Laskemalla näiden lukujen erotuksen, saatiin reaktion (1) reaktiotuotteena olevan veden määrä. Näin ollen kalsiumhydroksidin hajotessa syntyi vettä:

$$94,816 \% - 93,555 \% = 1,261 \%$$

Voidaan olettaa, että näytteen kokonaispaino oli 100 grammaa, jolloin reaktiotuotteena syntyneen veden määrä oli 1,261 grammaa. Tämän avulla voidaan laskea veden ainemäärä, kun tiedetään, että sen moolimassa on 18,015 g/mol. Yhtälön (3) avulla veden ainemääräksi saatiin:

$$\frac{1,261 \text{ g}}{18,015 \text{ g/mol}} = 0,06999 \dots \text{mol.}$$

Reaktioyhtälöstä (1) nähdään, että kun yksi mooli kalsiumhydroksidia reagoi, syntyy yksi mooli vettä. Tämän perusteella siis kalsiumhydroksidin ja veden ainemäärät ovat yhtä suuret. Kun tiedetään kalsiumhydroksidin ainemäärä, voidaan laskea sen massa. Kalsiumhydroksidin moolimassa on 74,092 g/mol, joten kalsiumhydroksidin massa oli yhtälön (3) perusteella:

$$0,06999... \text{ mol} \cdot 74,092 \text{ g/mol} = 5,1862... \text{ g.}$$

Alussa oletettiin, että alkuperäisen näytteen massa oli 100 grammaa, joten kalsiumhydroksidin määrä näytteessä prosentteina oli noin 5,2 %.

Kalsiumkarbonaatin määrä laskettiin samalla tavalla kuin kalsiumhydroksidin määrä. Kalsiumkarbonaatin hajoamisen lämpötiloissa painoprosentin arvot olivat 600 °C:ssa 91,095 ja 700 °C:ssa 87,872. Näiden lukujen erotus kertoo reaktiossa (2) syntyneen hiilidioksidin määrän. Kalsiumkarbonaatin hajotessa syntyi siis hiilidioksidia:

$$91,095 \% - 87,872 \% = 3,223 \%$$

Hiilidioksidin moolimassa on 44,009 g/mol ja yhtälön (3) perusteella hiilidioksidin ainemääräksi saatiin:

$$\frac{3,233 \text{ g}}{44,009 \text{ g/mol}} = 0,0732... \text{ mol.}$$

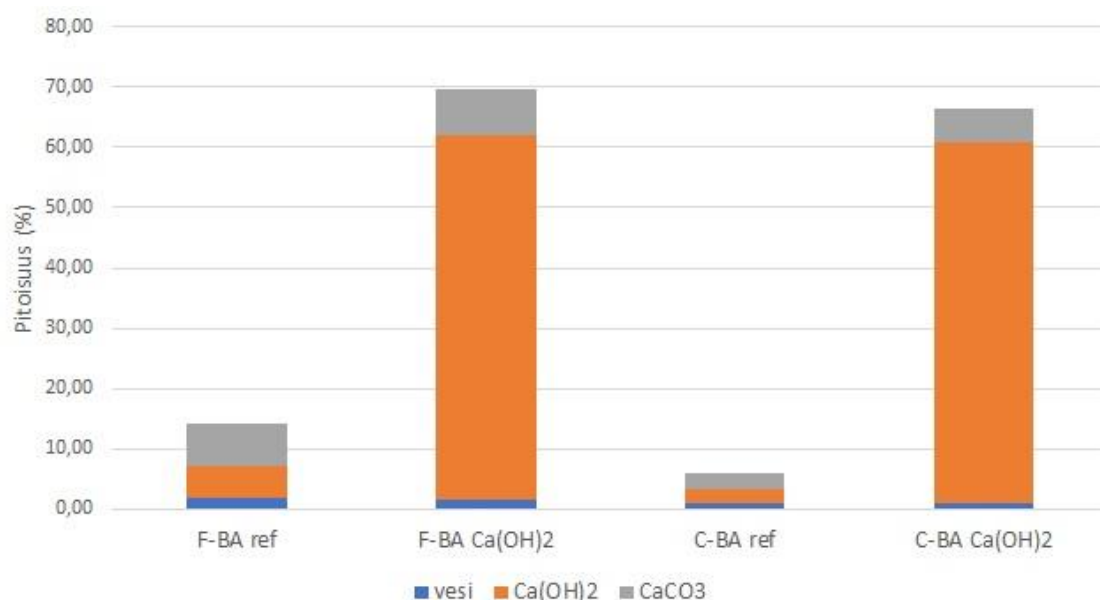
Reaktioyhtälöstä (2) nähdään, että hiilidioksidin ja kalsiumkarbonaatin ainemäärät ovat reaktiossa samat. Kalsiumkarbonaatin moolimassa on 100,086 g/mol, joten yhtälön (3) perusteella kalsiumkarbonaatin massa oli:

$$0,0732... \text{ mol} \cdot 100,086 \text{ g/mol} = 7,3298... \text{ g.}$$

Näytteessä oli siis noin 7,3 % kalsiumkarbonaattia. Laskuissa käytetyt arvot löytyvät liitteestä 7 ja näytteiden TGA-kuvaajat liitteestä 8.

Taulukko 8. TGA-laskujen tulokset. Tulokset pitoisuusprosentteina (%). F-BA viittaa hienoon pohjakuonaan ja C-BA karkeaan pohjakuonaan. Ref tarkoittaa paljasta kuonaa.

	F-BA ref	F-BA Ca(OH) <sub>2</sub>	C-BA ref	C-BA Ca(OH) <sub>2</sub>
Vesi	1,8	1,5	0,9	1,1
Ca(OH) <sub>2</sub>	5,2	60,5	2,5	59,8
CaCO <sub>3</sub>	7,3	7,7	2,6	5,6



Kuva 10. TGA-analyysin perusteella lasketut veden, kalsiumhydroksidin ja kalsiumkarbonaatin määrät näytteissä.

Paljaiden kuonien tuloksissa  $\text{Ca(OH)}_2$  määrä kertoo kalsiumoksidin määrän, joka on näytteiden valmistuksen aikana hydratoitunut kalsiumhydroksidiksi. Kahteen näytteeseen kalsiumhydroksidia lisättiin 30 grammaa. Jos oletetaan, että saman verran kalsiumoksidia hydratoitui myös kalsiumhydroksidia sisältäneissä näytteissä, saadaan laskettua, kuinka paljon kalsiumhydroksidia reagoi.

F-BA  $\text{Ca(OH)}_2$  -näytteessä kalsiumhydroksidin määrä oli 60,64 %. Kun tästä vähennetään paljaassa kuonassa olleen kalsiumhydroksidin määrä 5,19 %, saadaan kalsiumhydroksidin määräksi F-BA  $\text{Ca(OH)}_2$  näytteessä 55,35 %. Tämä määrä kertoo, kuinka paljon kalsiumhydroksidia hajosi TGA-analyysin aikana. Toisin sanoen, 55,35 % lisätystä kalsiumhydroksidista ei reagoinut reaktiotuotteiksi näytteen valmistuksen aikana. Reagoineen kalsiumhydroksidin määrä on  $100 \% - 55,35 \% = 44,65 \%$ . Koska kalsiumhydroksidia lisättiin näytteeseen 30 grammaa, tästä määrästä noin 13,40 grammaa reagoi. Samalla periaatteella C-BA  $\text{Ca(OH)}_2$  -näytteessä 42,70 % eli 12,81 grammaa lisätystä kalsiumhydroksidista reagoi.

Laskettu  $\text{CaCO}_3$ -määrä kertoo kalsiumhydroksidin määrän, joka karbonoitui näytteiden valmistuksen aikana. Hienossa kuonassa  $\text{CaCO}_3$ -määrä pysyy suunnilleen samana sekä ilman kalsiumhydroksidia että sen lisäyksen kanssa. Tämän perusteella voidaan sanoa, että kalsiumhydroksidin lisäyksellä ei ollut suurta merkitystä karbonoitumisreaktioon.

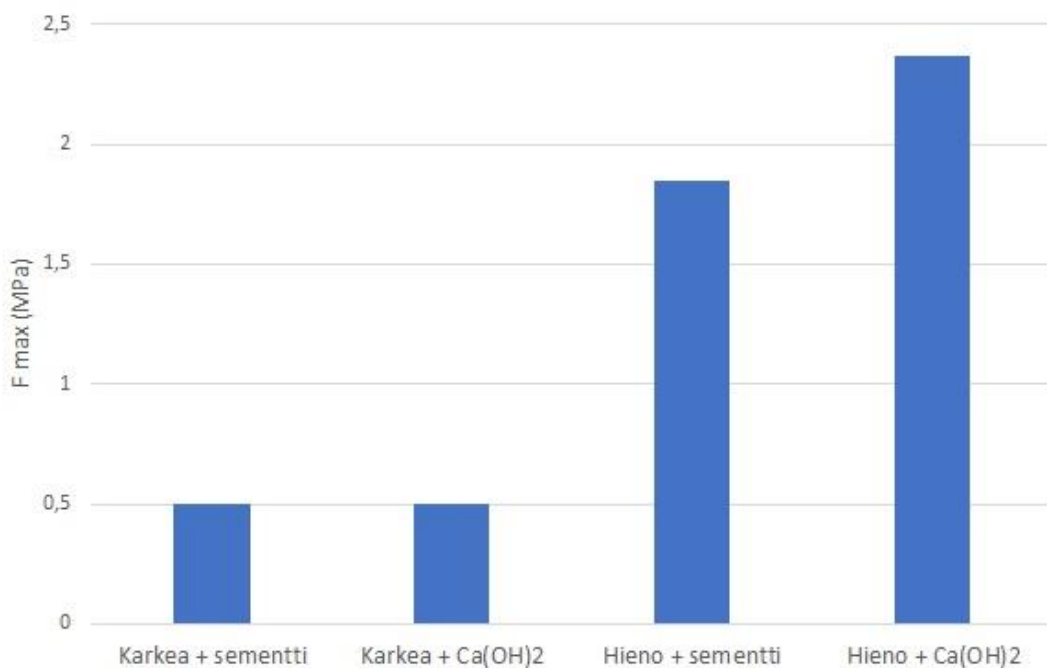
Karkeassa kuonassa ero on hieman suurempi. Tuloksista nähdään myös, että  $\text{CaCO}_3$ -määrä on suurempi hienossa kuonassa. Kuten mainittu kappaleessa 4.2, karbonatisoituminen on yksi kovettumista aiheuttavista reaktioista.

Samoissa lämpötiloissa, joissa vesi haihtuu, tapahtuu myös näytteiden valmistuksen aikana syntyneiden reaktiivisten tuotteiden, kuten kalsiumsilikaattihydraatin (C-S-H) ja ettringiitin hajoaminen (Ukrainczyk ym. 2006). Kuten tuloksista nähdään, näiden tuotteiden määrä näytteissä on erittäin pieni. Koska nämä tuotteet ovat tärkeitä lujittumisen kannalta, voidaan olettaa, että tämän kuonan lujittumisominaisuudet eivät ole kovin hyvät.

## **6.2 Koekappaleiden ominaisuudet**

### **6.2.1 Puristuslujuus**

Ensimmäisen vaiheen lujuuskokeen tulokset on esitetty kuvassa 11. Tulokset on laskettu kahden näytteen keskiarvona, poikkeuksena karkea pohjakuona + sementti -näyte, jossa toinen mittaus epäonnistui. Molempien karkeasta jakeesta tehtyjen kappaleiden puristuslujuuden keskiarvo oli noin 0,5 MPa. Hienosta kuonasta ja sementistä tehdyn koekappaleen puristuslujuuden keskiarvo oli noin 1,8 MPa ja hienosta kuonasta ja kalsiumhydroksidista tehdyn koekappaleen 2,4 MPa. Kuvaajasta nähdään selkeästi, että hienolla pohjakuonalla saavutettiin korkeampi puristuslujuus kuin karkealla kuonalla. Lisäksi  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  näyttäisi toimivan paremmin sideaineena kuin sementti. Ensimmäisen vaiheen perusteella kokeita päätettiin jatkaa hienolla pohjakuonalla, joka lujittui selvästi paremmin.

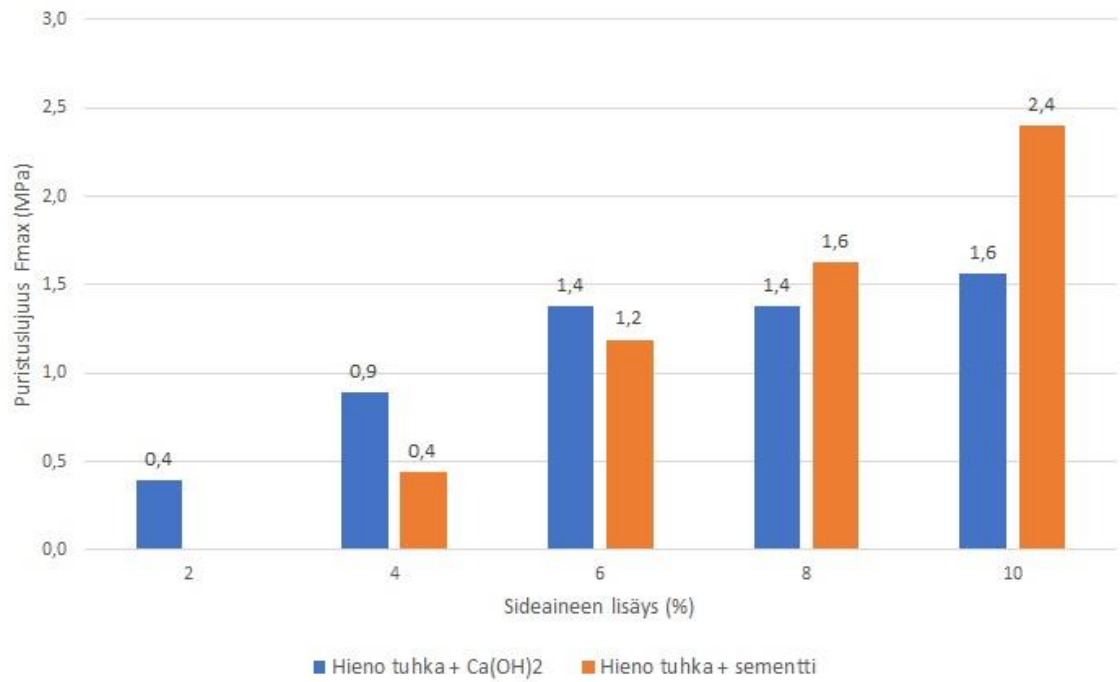


Kuva 11. Ensimmäisen vaiheen lujuuskokeiden tulokset kahden päivän lujittumisen jälkeen.

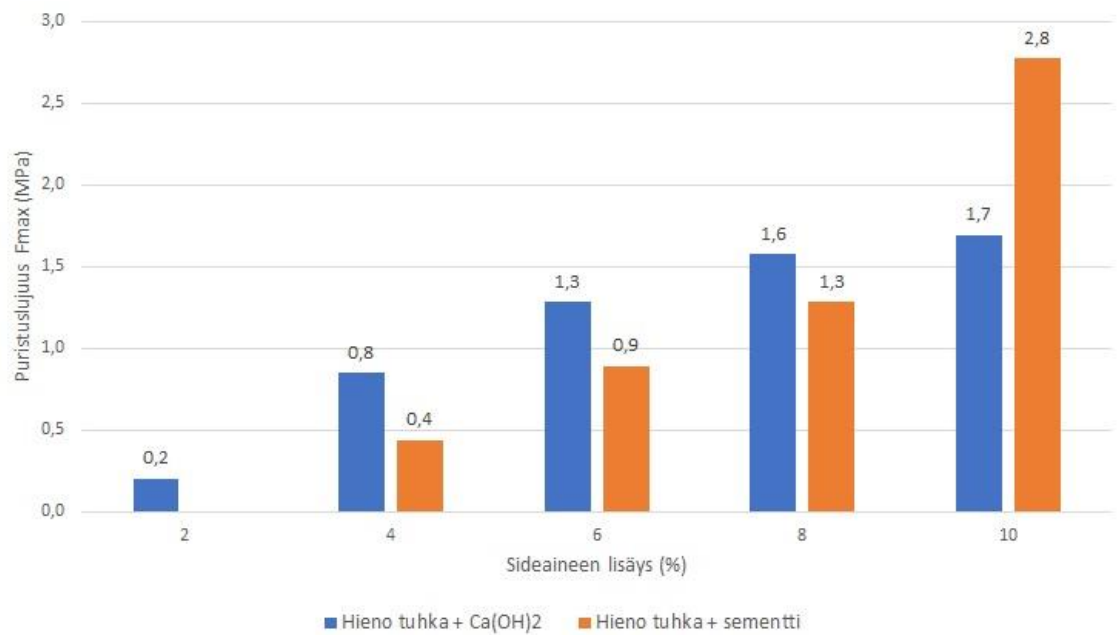
Toisen vaiheen lujuuskokeiden tulokset on esitetty kuvissa 12–15. Kuvassa 12 on esitetty lujuus kolmantena päivänä ja kuvassa 13 lujuus seitsemäntenä päivänä. Kuvissa 14 ja 15 on esitetty koekappaleiden lujuuden kehitykset sekä lujuuksien minimi- ja maksimiarvot. Jokaiselle sideaineen lisäykselle on laskettu kolmen koekappaleen antama keskiarvo. Sementin 2 % lisäykselle ei saatu tehtyä puristuslujuuskoetta, sillä koekappaleet eivät lujittuneet.

Kalsiumhydroksidia sisältävien koekappaleiden puristuslujuusarvot vaihtelivat kolmantena päivänä välillä 0,4–1,6 MPa ja sementtiä sisältävien kappaleiden välillä 0,4–2,4 MPa. Seitsemäntenä päivänä kalsiumhydroksidia sisältävien koekappaleiden lujuudet vaihtelivat välillä 0,2–1,7 MPa ja sementtiä sisältävien välillä 0,4–2,8 MPa. Kuvaajista nähdään, että kalsiumhydroksidilla saavutetaan pienemmillä sideainemäärillä korkeammat lujuustulokset. Kalsiumhydroksidilla lujuudenkehitys ei ole kovin suurta yli 6 % lisäyksellä, kun taas sementillä lujuus selvästi kehittyy mitä enemmän sitä lisätään. Huomattavaa on myös, että pienemmillä sideaineen lisäyksillä kolmannen päivän tulokset ovat suuremmat kuin seitsemännen päivän, eli näillä kappaleilla lujuus on heikentynyt ajan kuluessa.

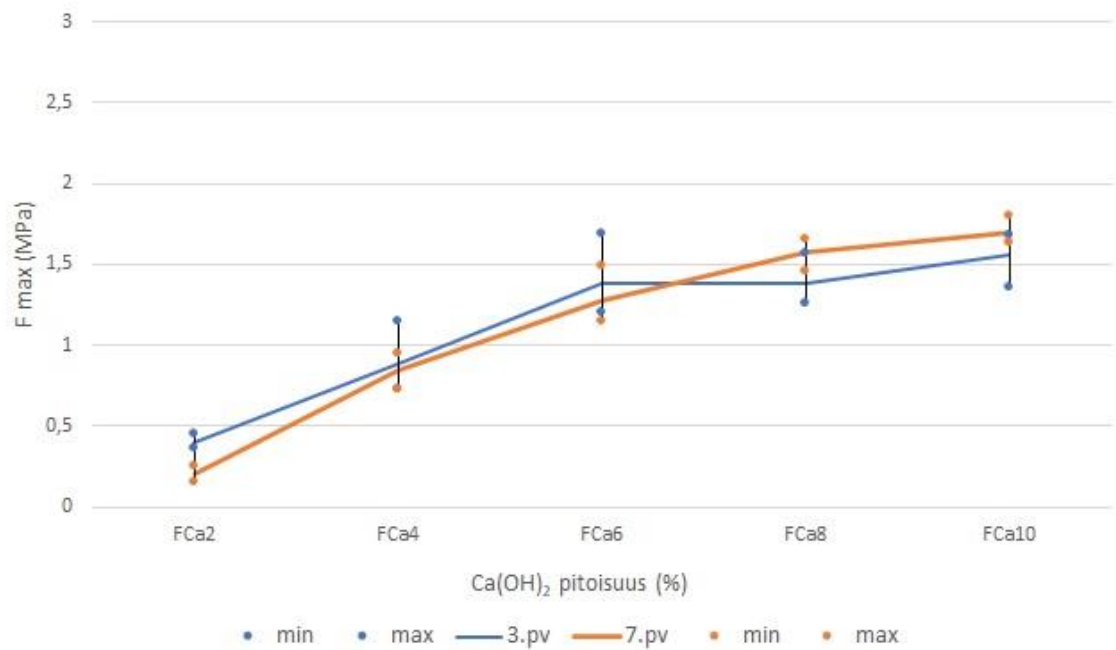




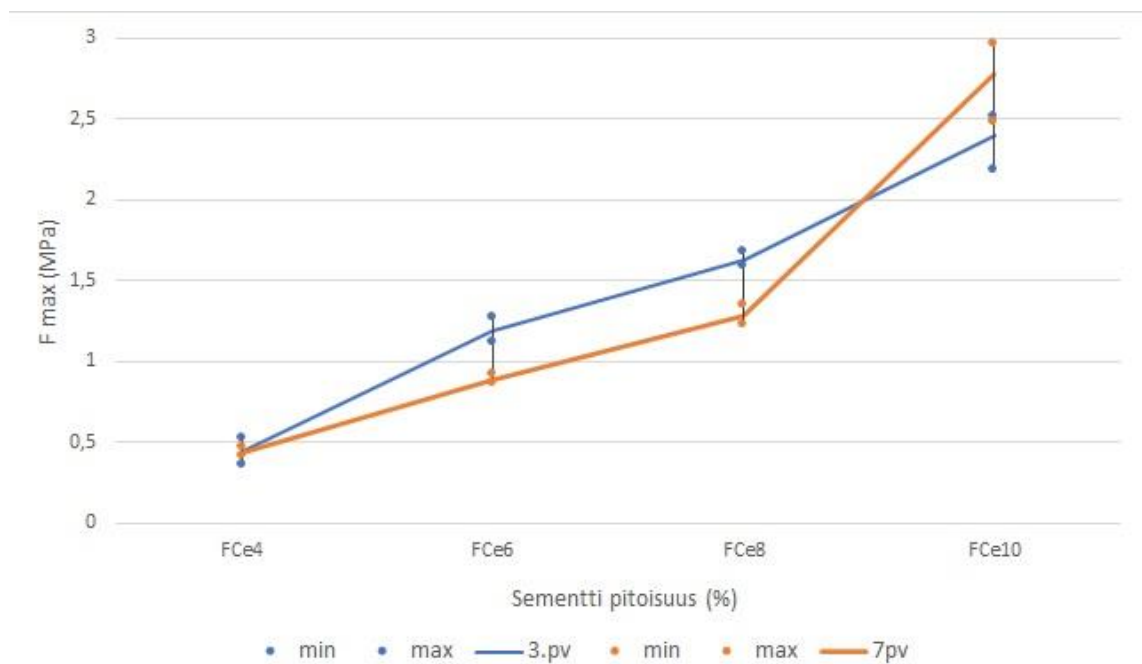
Kuva 12. Toisen vaiheen koekappaleiden puristuslujuus kolmantena päivänä.



Kuva 13. Toisen vaiheen koekappaleiden puristuslujuus seitsemäntenä päivänä.



Kuva 14. Kalsiumhydroksidia sisältävien koekappaleiden lujuuden kehitys.



Kuva 15. Sementtiä sisältävien koekappaleiden lujuuden kehitys.

### 6.2.2 Veden imeytyminen

Ensimmäisessä vaiheessa testattiin koekappaleiden vedenkestävyyttä. Kuvissa 16 ja 17 on esitetty koekappaleet sen jälkeen, kun niitä on yritetty hajottaa. Karkeasta kuonasta tehdyt näytteet hajosivat niiden oltua vedessä. Kappale, jossa sideaineena käytettiin

sementtiä, oli hieman vahvempi kuin kalsiumhydroksidia sisältänyt kappale. Hienosta kuonasta tehdyt näytteet kestivät hyvin vedessä olon, eikä kumpikaan hajonnut käsivoimin.



Kuva 16. Karkeasta kuonasta valmistetut koekappaleet sisältäen kalsiumhydroksidia (vasen) ja sementtiä (oikea) vuorokauden vedessä olon jälkeen.

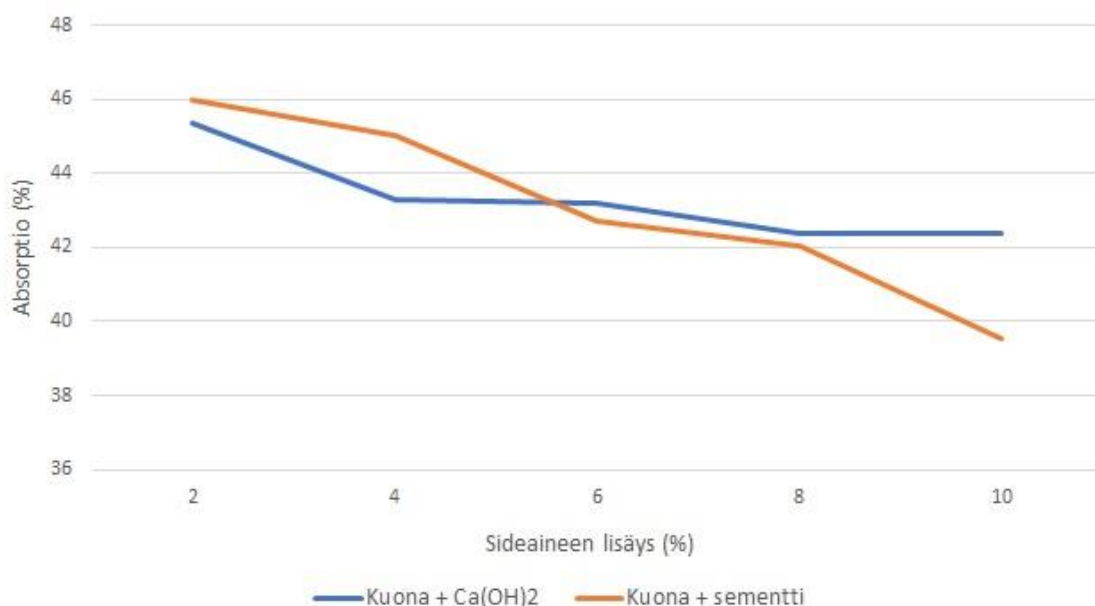


Kuva 17. Hienosta pohjakuonasta valmistetut koekappaleet sisältäen kalsiumhydroksidia (vasen) ja sementtiä (oikea) vuorokauden vedessä olon jälkeen.

Liitteessä 9 on esitetty kaikkien toisen vaiheen koekappaleiden märkä- ja kuivapainot sekä lasketut absorptioarvot. Esimerkkinä on laskettu 2 % kalsiumhydroksidia sisältävän, ensimmäisen koekappaleen absorptio. Kyseisen näytteen märkäpaino oli 16,73 grammaa ja kuivapaino 11,45 grammaa. Kyseisen näytteen absorptio yhtälön (4) perusteella oli:

$$100 \% \cdot \frac{16,73 \text{ g} - 11,45 \text{ g}}{11,45 \text{ g}} = 46,11 \%$$

Kalsiumhydroksidia sisältävien näytteiden absorptio keskiarvot vaihtelivat välillä 42–45 % ja sementtiä sisältävillä keskiarvot vaihtelivat välillä 40–46 %. Kuvassa 18 on esitetty näytteiden absorptio keskiarvot sideaineen määrän funktiona. Kuvaajasta nähdään, että pienemmillä sideaineen lisäyksillä kalsiumhydroksidi antaa pienemmät absorptioarvot mutta 6 % lisäyksestä eteenpäin sementtiä sisältävien kappaleiden arvot ovat pienemmät. Korkeat absorptioarvot voidaan selittää kuonan pienellä partikkelikoolla, joka johtaa suureen pinta-alaan ja siten suurempaan absorptioon (Baalbaki ym. 2019).



Kuva 18. Koekappaleiden absorptiotulokset.

### 6.2.3 Mineraloginen koostumus

XRD-analyysi tehtiin näytteille, johon oli lisätty 2, 6 ja 10 % kalsiumhydroksidia sekä 6 ja 10 % sementtiä. Kaikissa kalsiumhydroksidia sisältävissä näytteissä oli albiitti-anortiitti yhdistettä, kalsiumkarbonaattia, kvartsia, ettringiittiä sekä suurena määränä tuntematonta ainetta. Sementtiä sisältäneet näytteet sisälsivät molemmat ettringiittiä, kalsiumkarbonaattia, kvartsia ja suurina pitoisuuksina tuntematonta ainetta. Pääosin koekappaleisiin oli siis syntynyt uutena faasina ettringiittiä ja lisäksi kalsiumkarbonaatin määrä oli noussut verrattuna paljaaseen hienoon pohjakuonaan. Liitteissä 10-14 on esitetty koekappaleiden XRD-tulokset.

#### 6.2.4 Liukoisuusominaisuudet

Kaikki liukoisuusominaisuudet on esitetty taulukossa 9. Taulukosta löytyy sekä jauhetun karkean ja hienon pohjakuonan liukoisuudet, että valittujen koekappaleiden liukoisuudet.

Kun verrataan hienon ja karkean kuonan mitattuja liukoisuusarvoja MARA-asetuksen raja-arvoihin, huomataan, että arvot ylittyvät muutamilla haitta-aineilla. Kupari, molybdeeni, antimoni, kloridi, sulfaatti ja liuennut orgaaninen hiili ovat haitta-aineet, jotka ylittävät ainakin joidenkin hyödyntämiskohteiden raja-arvot. Näistä haitta-aineista suurin osa ylittää vain peitetylle väylälle ja/tai kentälle asetut raja-arvot. Sen sijaan kloridi ylittää molemmilla jakeilla myös päällystetyn kentän raja-arvon ja liuennut orgaaninen hiili ylittää molemmilla jakeilla kaikki raja-arvot. Hienolla kuonalla myös sulfaatin määrä ylittää kaikki raja-arvot. Huomioitavaa kuitenkin on, että tulokset eivät ole suoraan verrattavissa MARA-asetukseen, sillä asetuksessa vaaditaan 2-vaiheinen ravistelutesti ja tässä työssä suoritettiin vain 1-vaiheinen ravistelutesti.

Huomattavaa on se, että joidenkin haitta-aineiden liukoisuus nousi, kun verrataan koekappaleiden arvoja jauhetun hienon pohjakuonan arvoihin. Nousseet liukoisuusarvot on merkitty taulukkoon vaaleansinisellä pohjavärillä. Mitatuista haitta-aineista kromin, kuparin, molybdeenin, lyijyn, vanadiinin, sinkin ja liunneen orgaanisen hiilen liukoisuudet pääosin nousivat. Lisäksi fluoridin liukoisuus nousi sementtiä sisältäneissä koekappaleissa. Liukoisuuksien nousuun voi olla syynä muun muassa pH:n nousu. Esimerkiksi amfoteeristen metallien, kuten lyijyn ja sinkin, liukoisuudet nousevat voimakkaasti emäksisissä olosuhteissa (Sabbas ym. 2003). Lisäksi tutkimuksissa on havaittu, että kuparin liukoisuus on jossain määrin riippuvainen orgaanisen hiilen määrästä (Olsson ym. 2009). Taulukosta voidaan nähdä, että koekappaleissa kyseisten aineiden liukoisuudet ovat nousseet. Sorlini ym. (2017) tekemän tutkimuksen perusteella näytteiden murskaaminen johtaa osalla aineista suurempiin liukoisuuksiin, johtuen kasvaneesta ominaispinta-alasta.

Taulukko 9. Jauhetun karkean ja hienon pohjakuonan liukoisuudet sekä valittujen koekappaleiden liukoisuudet. Liukoisuudet on ilmoitettu yksikössä [mg/kg] ja johtavuus yksikössä [mS/cm]. Vaaleansinisellä pohjavärillä on merkitty koekappaleiden liukoisuudet, jotka ovat nousseet verrattuna paljaaseen hienoon pohjakuonaan. \* TDS = Total Dissolved Solids eli liuenneiden kiintoaineiden kokonaismäärä.

	Karkea	Hieno	FCe6	FCe10	FCa2	FCa6	FCa10
pH	10,50	9,96	11,66	11,95	11,22	11,83	12,07
johtavuus	3,71	6,33	4,35	5,33	4,15	4,64	5,85
As	0,031	0,044	0,038	0,034	0,034	0,036	0,031
Ba	0,26	0,32	0,17	0,17	0,22	0,12	0,19
Cd	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Cr	0,018	0,22	0,28	0,38	0,14	0,49	0,82
Cu	3,7	6,9	9,8	8,8	8,9	11	9,6
Mo	0,97	1,8	1,9	1,7	1,6	2,7	2,4
Ni	0,093	0,17	0,093	0,064	0,1	0,06	0,05
Pb	<0,004	<0,004	0,006	0,048	<0,004	0,022	0,094
Sb	0,68	0,63	0,39	0,28	0,41	0,41	0,3
Se	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04
V	0,096	0,067	0,72	0,55	0,19	0,15	0,093
Zn	<0,04	0,045	0,05	0,23	0,091	0,63	1,3
Hg	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004
DOC	2400	11000	76000	54000	35000	21000	42000
F	<5	<5	6,9	11	<5	<5	<5
Cl	4600	9000	5400	6100	5800	5400	5400
SO <sub>4</sub>	10000	21000	7100	3600	10000	4700	3600
TDS *	22000	47000	25000	25000	29000	25000	29000

### 6.3 Tulosten yhteenveto

Kuonien perusominaisuuksien tuloksista havaitaan, että kemiallinen koostumus on samankaltainen kuin aikaisemmissa tutkimuksissa. Hienossa jakeessa havaittiin enemmän kalsiumia, joka voisi johtaa korkeaan lujuustasoon esiintyessään aktiivisena kalkkina. XRF-tulosten perusteella ei voida kuitenkaan kertoa missä muodossa kalsium esiintyi. XRD:n perusteella molemmista jakeista löytyi kvartsia, joka on myös kirjallisuuden perusteella yksi yleisemmistä faaseista. Hienossa kuonassa havaittiin myös toista yleistä faasia, kalsiittia. TGA:n perusteella lujittumisen kannalta tärkeiden

tuotteiden, kuten ettringiitin ja kalsiumsilikaattihydraatin, määrä oli pieni sekä paljaissa kuonissa, että näytteissä, johon oli lisätty kalsiumhydroksidia. Tämän perusteella voidaan olettaa, että tutkittujen kuonien lujittumisominaisuudet eivät ole hyvät.

Lujuuskokeiden perusteella saatiin vahvistus sille, että tutkittava kuona ei sovellu sellaisenaan sideainekäyttöön. Ensimmäisen vaiheen lujuuskokeiden tulosten perusteella karkean kuonan soveltuvuus suljettiin pois ja tutkimuksia jatkettiin hienolla kuonalla. Toisessa vaiheessa havaittiin kuitenkin, että koekappaleiden lujuudet jäivät huomattavasti sementille standardissa SFS-EN 197-1 asetetuista varhaislujuusarvoista. Standardissa asetetut varhaislujuuden arvot riippuvat sementin lujuusluokasta, mutta pienimmillään lujuuden tulee olla kahden vuorokauden kohdalla yli 10 MPa. Paras tulos saatiin 10 % sementin lisäyksellä, jolloin puristuslujuuden keskiarvo oli seitsemäntenä päivänä 2,8 MPa. Tuloksia verrattiin sementin laatuvaatimukseen, sillä jätteenpolton pohjakuonalle ei ole omia vaatimuksia.

Syynä kuonan alhaiseen lujittumiseen voisi mahdollisesti olla korkea orgaanisen aineksen määrä. Vaikka hehkutushäviö ei välttämättä anna todenmukaista kuvaa kuonien orgaanisen aineksen määrästä, liukoisuuskokeissa havaitut korkeat liunneen orgaanisen hiilen määrät viittaavat siihen, että tutkitussa kuonassa on paljon orgaanista ainetta. Armin (2003) tekemissä tutkimuksissa on havaittu, että orgaanisen aineen määrällä on vaikutusta pohjakuonasta tehtyjen koekappaleiden jäykkyyteen. Jäykkyyshuomion (*resilient modulus*) arvo nousi 50 %, kun orgaanisen aineen määrä puolittui 8 %:sta 4 %:iin. Tämän perusteella pohjakuonan tekninen käytettävyyys paranee huomattavasti, jos orgaanisen aineksen määrä pysyy alhaisena.

Kun katsotaan koekappaleiden XRD-tuloksia, huomataan, että kaikkiin näytteisiin on syntynyt uutena faasina ettringiittiä ja kalsiumkarbonaatin määrä on lisääntynyt. Eniten ettringiittiä on 10 % sementtiä sisältävässä näytteessä. Tuloksista voidaan siis nähdä suora yhteys kovettumiseen vaikuttavien faasien ja näytteiden lujittumisen välillä. XRD tulokset olivat joiltain osin hiukan poikkeavia kirjallisuuteen verrattuna. Lisäksi analyysissä ei saatu selkeitä tuloksia kaikille piikeille, joten osa faaseista jäi selvittämättä. XRD-tuloksissa pienimpinä pitoisuuksina esiintyvien faasien oikeellisuutta ei voi pitää varmana.

Koekappaleiden liukoisuusominaisuuksissa tapahtui sekä positiivista, että negatiivista kehitystä verrattuna paljaaseen hienoon kuonaan. Kromin, kuparin, molybdeenin, lyijyn,

vanadiinin, sinkin ja liunneen orgaanisen hiilen liukoisuudet pääosin nousivat. Lisäksi fluoridin liukoisuus nousi sementtiä sisältäneissä näytteissä. Muilta osin liukoisuudet pienenivät tai pysyivät samoina. Liukoisuuksien nousua voi selittää muun muassa pH:n nousu ja koekappaleiden murskaaminen. Koekappaleiden liukoisuusarvoja ei voi verrata suoraan MARA-asetuksen raja-arvoihin, sillä kyseisessä asetuksessa ei säädetä jätteiden hyötykäytöstä sideaineena. Jotain viitteitä voidaan kuitenkin saada siitä, mitkä haitta-aineet voivat aiheuttaa ongelmia. Erityisesti tulisi kiinnittää huomiota haitta-aineisiin, joiden liukoisuudet nousivat verrattuna paljaaseen kuonaan. Tutkitussa kuonassa selkeästi suurin ongelma oli liunneen orgaanisen hiilen määrä, jonka raja-arvoksi on MARA-asetuksessa asetettu 500 mg/kg. Tämä arvo ylittyi huomattavasti kaikissa tutkituissa näytteissä.

Tuloksissa on huomioitava, että kokeissa ei ole noudatettu mitään standardeja (pois lukien liukoisuusominaisuudet). Esimerkiksi sementin lujuus tulee määritellä standardin EN 196-1 mukaisesti, mutta tämän työn koekappaleiden mittauksissa kyseistä standardia ei ole noudatettu. Myöskään liukoisuusominaisuudet eivät ole täysin vertailukelpoisia MARA-asetuksen raja-arvoihin, sillä määrittelyyn on käytetty asetuksen vaatiman 2-vaiheisen ravistelutestin sijaan 1-vaiheista ravistelutestiä. Työn tulokset antavat kuitenkin riittävän tarkan kuvan tutkitun kuonan ominaisuuksista ja kelpoisuudesta tutkittuun käyttökohteeseen. Saatuja tuloksia ei voi yleistää koskemaan muita pohjakuonia, sillä poltettavan jätteen laadulla, polttoprosessilla ja käsittelyllä on vaikutusta kuonien ominaisuuksiin.



## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Työn aikana havaittiin, että jätteenpolton pohjakuonan ominaisuuksiin vaikuttaa merkittävästi poltettavan jätteen laatu ja koostumus sekä käytettävä polttotekniikka. Polton jälkeen ympäristö- ja teknisiin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa erilaisilla käsittelytekniikoilla. Kuonan ominaisuudet ovat tärkeä ymmärtää, jotta se voidaan saada onnistuneesti hyötykäyttöön. Kuonille on jo löydetty monia potentiaalisia käyttökohteita, ja olisikin tärkeä tutkia näiden hyödyntämistä laajemmassa mittakaavassa. Laboratoriossa tehtyjen kokeiden perusteella olisi hyvä lähteä laajentamaan tutkimuksia kenttäkokeisiin, ja näin saada arvokasta tietoa kuonien todellisesta potentiaalista.

Tierakenteessa käytettävän sideaineen vaatimukset ovat sideainekohtaisia. Suurimmalle osalle uusiomateriaaleista ei löydy omaa ohjeistusta tai vaatimuksia, ja jätteenpolton pohjakuona on yksi näistä materiaaleista. Tämän takia tässä työssä tuloksia on verrattu sementtistabiloinnin vaatimuksiin. Jos pohjakuonia halutaan laajemmissa määrin käyttöön, olisi niille hyvä kehittää oma ohjeistus. Ohjeistukseen tulisi kirjata yleiset laatuvaatimukset sekä tutkimuksiin soveltuvat kokeet. Koska kuonien ominaisuudet voivat vaihdella suurestikin, olisi myös tärkeä miettiä, miten laadunvalvonta suoritetaan tarpeeksi kattavasti.

Pohjakuonien hyödyntämisessä yksi isoimmista huolenaiheista on kirjallisuuden mukaan haitallisten aineiden liukeneminen. Vaikka pohjakuonat lähtökohtaisesti sisältävät vähemmän haitallisia aineita kuin lentotuhkat, niissä esiintyy kuitenkin esimerkiksi raskasmetalleja. Lyhyen aikavälin liukoisuustutkimuksia on suhteellisen paljon saatavilla, mutta pitkän aikavälin vaikutuksista on vähemmän tietoa. Pohjakuonien hyödyntämiseksi laajemmassa mittakaavassa olisikin tärkeä tutkia pitkän aikavälin liukoisuusominaisuuksia ja miten esimerkiksi säävaihtelut vaikuttavat näihin ominaisuuksiin. Tässä työssä havaittiin, että joidenkin haitta-aineiden liukoisuudet nousivat koekappaleissa, joihin oli lisätty sementtiä tai kalsiumhydroksidia. Syyt tämän ilmiön takana täytyy olla selvillä, ennen kuin hyödyntäminen sideaineena on mahdollista.

Tehtyjen tutkimusten perusteella tässä työssä tutkittu kuona ei sellaisenaan sovellu sideainekäyttöön tierakenteen kantavaan kerrokseen. Tähän voi olla syynä muun muassa kokeissa havaittu korkea orgaanisen aineen määrä. Tutkitulle kuonalle voisi tehdä vielä TOC-analyysin (total organic carbon, orgaaninen kokonaishiili), jotta saadaan orgaanisen

aineen määrälle varmistus. Tämän perusteella voitaisiin jatkossa tutkia mahdollisia parannuksia esimerkiksi polttoprosessiin, jotta orgaanisen aineen määrää saataisiin vähennettyä. Tutkitun kuonan ominaisuuksia voisi myös olla mahdollista parantaa kehittämällä käsittelyprosessia. Kuonalle voitaisiin etsiä myös muita hyödyntämiskohteita. Karkealla kuonalla liukoisuusarvot olivat suurimmaksi osaksi pienempiä kuin hienolla kuonalla ja verrattaessa MARA-asetuksen raja-arvoihin, vain liunneen orgaanisen hiilen raja-arvo ylittyi päällystetyn väylän osalta. Tämän perusteella tutkimalla alkuperäisen kuonan partikkelikokojakauma, voitaisiin tutkia kuonan soveltuvuutta tierakenteeseen hiekan tai soran korvikkeeksi.

Saatuja tuloksia ei voi yleistää koskemaan muita pohjakuonia, joten on hyvin mahdollista, että eri polttolaitoksen tai erilaisen käsittelyprosessin läpikäynyt pohjakuona voisi sopia sideaineeksi. Kuonan aktivointiin voitaisiin myös kokeilla käyttää eri aineita, kuten esimerkiksi alkaliaktivaattoreita. Potentiaalisen sideaineseoksen löytyessä tulee tutkimuksia jatkaa valmistamalla stabilointimassanäytteitä ja tutkimalla näiden näytteiden avulla soveltuvuus kantavan kerroksen stabilointiin.

## 8 YHTEENVETO

Jätteenpolttolaitoksissa jätteet voidaan hyödyntää energiana ja samalla jätteen massa ja tilavuus pienenevät. Polttoprosessissa syntyy jakeina pohjakuonaa, kattila- ja lentotuhkaa sekä savukaasujen puhdistuksen reaktiotuotteita. Jätteenpolton pohjakuona sisältää lähtökohtaisesti vähemmän haitta-aineita kuin esimerkiksi lentotuhka, joten ne se on potentiaalinen materiaali hyödynnettäväksi kierotaloudessa. Tämän työn tavoitteena oli selvittää, voidaanko Fortum Waste Solutions Oy:n toimittamaa jätteenpolton pohjakuonaa hyödyntää sideaineena tierakenteen kantavassa kerroksessa. Tavoitetta varten muotoiltiin kolme tutkimuskysymystä, joihin saatiin vastaukset kirjallisuusselvityksen ja kokeellisen osuuden avulla.

Kirjallisuuden avulla tutustuttiin jätteenpolton pohjakuonan perusominaisuuksiin. Kuonan ominaisuuksiin vaikuttavat muun muassa poltettavan jätteen koostumus sekä käytettävä polttotekniikka. Partikkelikooltaan alle 10 cm jae on yleensä suhteistunutta. Hienoaines voi tahmeuden takia aiheuttaa ongelmia kuonan käsittelyssä. Hienoaineksen korkea absorptiokyky voi aiheuttaa ongelmia myös hyödyntämiskohteessa. Vesipitoisuus on usein korkea, sillä useimmissa polttolaitoksissa kuona jäähdytetään vedellä. Absorptioarvot ovat kuonalle yleensä suuremmat kuin luonnonkiviainekselle, mutta tiheysarvot sen sijaan pienempiä. Pohjakuonassa esiintyy suurimpina pitoisuuksina piioksidia, kalkkia, rauta(III)oksidia sekä alumiinioksidia. Raskasmetallien, kuten kuparin, lyijyn ja sinkin liukeneminen voi olla ongelma. Kuonien lujittumiseen vaikuttavat monet reaktiot ja syntyvät faasit riippuvat siitä, käytetäänkö jotain aktivaattoria. Veden kanssa reagoidessaan pohjakuona muodostaa ettringiittiä ja kipsiä, sementin seosaineena muodostuu C-S-H geeliä ja portlandiittiä.

Kirjallisuuskatsauksen avulla tutkittiin myös kuonien käsittelymenetelmiä. Ne voidaan jakaa kemiallisiin, fysikaalisiin ja termisiin menetelmiin. Käsittelyn avulla voidaan parantaa kuonan ominaisuuksia sekä ympäristön ja teknisten ominaisuuksien kannalta, sekä erottaa joukosta metallit. Tutkimusten mukaan pohjakuonaa voisi mahdollisesti hyödyntää portlandsementin raaka-aineena sekä korvaamaan luonnonkiviaines betonituotteissa ja maarakentamisessa. Suomessa on myynnissä pohjakuonasta valmistettu keinokiviainestuote ja lisäksi pohjakuonaa on käytetty onnistuneesti tierakenteissa jakavassa kerroksessa.

MARA-asetuksessa on esitetty vaatimuksia, jotka täyttämällä pohjakuonaa voidaan hyödyntää ilmoitusmenettelyllä väylä- ja kenttärakenteissa sekä teollisuus- ja varastorakennusten pohjarakenteissa luonnonkiviainesten korvikkeena. Työn aikana havaittiin, että uusiomateriaaleille ei kuitenkaan ole juurikaan asetettuja vaatimuksia teknisten käyttökelpoisuuksien osalta. Lähtökohtaisesti uusiomateriaaleille on ehdotettu käytettäväksi samoja vaatimuksia kuin luonnonkiviaineksille. Myöskään sideaineena hyödynnettävälle uusiomateriaalille ei löydy suoraan ohjeistusta, mutta sille voidaan soveltuvien osin noudattaa sementtistabiloinnin ohjetta.

Kokeellisessa osuudessa selvitettiin pohjakuonan ominaisuudet mittaamalla partikkelikoko, tiheys, hehkutushäviö, kemiallinen ja mineraloginen koostumus sekä liukoisuusominaisuudet. Koekappaletutkimuksien avulla mitattiin kuonan lujittumista sekä tutkittiin, miten kovettuminen vaikuttaa kappaleiden mineralogiaan ja liukoisuuksiin. Tuloksien perusteella todettiin, että tutkittava pohjakuona ei sovellu sideaineeksi. Yksi syy toimimattomuudelle voi olla hienossa kuonassa havaittu korkea orgaanisen aineksen määrä, sillä se heikentää kuonan teknistä käytettävyyttä. Kuonan ominaisuuksia on kuitenkin mahdollista parantaa esimerkiksi kehittämällä poltto- ja käsittelyprosessia. Lisäksi pohjakuonalla voisi olla myös muita potentiaalisia hyödyntämiskohteita, esimerkiksi karkea kuona voisi soveltua käytettäväksi väylärakentamisessa luonnonkiviaineksen korvikkeena. Uudet soveltamiskohteet vaativat kuitenkin uudet tutkimukset. Tämän työn tuloksia ei voida yleistää koskemaan kaikkia jätteenpolttolaitoksen pohjakuonia, sillä muun muassa poltettavan jätteen laatu vaikuttaa kuonan ominaisuuksiin.

## LÄHDELUETTELO

An, J., Kim, J., Golestani, B., Tasneem, K. M., Abdullah Al Muhit, B., Hyun Nam, B., Behzadan, A. H., 2014. Evaluating the use of waste-to-energy bottom ash as road construction materials. Final report [verkkodokumentti]. Florida: State of Florida Department of Transportation. Saatavissa: <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/27252> [viitattu 9.2.2021]

An, J., Kim, J., Hyun Nam, B., 2017. Investigation on Impacts of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash on Cement Hydration. *Aci Materials Journal*, 114(5), S. 701-711.

Arm, M., 2003. Mechanical Properties of Residues as Unbound Road Materials – experimental tests on MSWI bottom ash, crushed concrete and blast furnace slag [verkkodokumentti]. Väitöskirja. Tukholma. Saatavissa: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1299982/FULLTEXT01.pdf> [viitattu 28.6.2021]

Arm, M., Larsson, L., Tiberg, C., Lind, B. & Arvidlund, O., 2008. Uppföljning av slaggrusprovvägar, Fallviktsmätning på provsträckor på Törringevägen utanför Malmö och Dåvamyran utanför Umeå. Grundvatten-och lakvattenanalyser på provsträckor vid Dåvamyran i Umeå, Miljöriktig användning av askor Värmeforsk [verkkodokumentti]. Tukholma: VÄRMEFORSK Service AB. ISSN 0282-3772. Saatavissa: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/948947> [viitattu 7.6.2021]. 81 s.

Baalbaki, O., Elkordi, A., Ghanem, H., Machaka, M. & Khatib, J. M., 2019. Properties of concrete made of fine aggregates partially replaced by incinerated municipal solid waste bottom ash. *Academic Journal of Civil Engineering*, 37(2), S. 532–538.

Barberio, G., Buttol, P., Masoni, P., Scalbi, S., Andreola, F., Barbieri, L. & Lancelotti, I., 2010. Use of incinerator bottom ash for frit production. *Journal of Industrial Ecology*, 14(2), S. 200–216.

Belt, J., Lämsä, V. P., Savolainen, M. & Ehrola, E., 2002. Tierakenteen vaurioituminen ja tiestön kunto, Tiehallinnon selvityksiä 15/2002. Helsinki: Edita Prima Oy, 74 s. ISBN 951-726-881-5

Bendz, D., Arm, M., Flyhammar, P., Westberg, G., Sjöstrand, K., Lyth, M. & Wik, O., 2006. Projekt Vändöra: En studie av långtidsegenskaper hos en väg anlagd med bottenaska från avfallsförbränning, Miljöriktig användning av askor 964 [verkkodokumentti]. Tukholma: VÄRMEFORSK Service AB. ISSN 1653-1248. Saatavissa: <https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/19016/projekt-vandora-varmeforskrapport-964.pdf> [viitattu 7.6.2021]. 84 s.

Bethanis, S. & Cheeseman, C. R., 2004. Production of lightweight aggregate from incinerator bottom ash and pulverised fuel ash. Teoksessa: Popov, V., Itoh, H., Brebbia, C. A. & Kungolos, S. (toim.) Waste Management and the Environment II. WIT Press, S. 55 – 64. ISBN 1-85312-738-8

Born, J-P., 2018. Mining Incinerator Bottom Ash for Heavy Non-Ferrous Metals and Precious Metals. Teoksessa: Thiel, S., Thomé-Kozmiensky, E., Winter, F. & Juchelková, D. (toim.) Waste Management, Volume 8 Waste-to-Energy. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, S. 275-286. ISBN 978-3-944310-42-8

Bunge, R. 2019. Recovery of metals from waste incinerator bottom ash [verkkodokumentti]. Rapperswil: Institut für Umwelt und Verfahrenstechnik UMTEC. Saatavissa: [https://www.igenass.ch/fileadmin/user\\_upload/igenass.ch/Dokumente/Publikationen/Metals\\_from\\_MWIBA\\_6\\_2019.pdf](https://www.igenass.ch/fileadmin/user_upload/igenass.ch/Dokumente/Publikationen/Metals_from_MWIBA_6_2019.pdf) [viitattu 25.1.2021]

Böni, D. & Morf, L., 2018. Thermo-Recycling – Efficient Recovery of Valuable Materials from Dry Bottom Ash. Teoksessa: Holm, O. & Thomé-Kozmiensky, E. (toim.) Removal, Treatment and Utilization of Waste Incineration Bottom Ash. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, S. 25-37. ISBN 978-3-944310-44-2

Caprai, V., Gauvin, F., Schollbach, K. & Brouwers, H. J. H., 2019. MSWI bottom ash as binder replacement in wood cement composites. Construction and Building Materials, 196, S. 672–680.

Chandler, A. J., Eighmy, T. T., Hatrlén, J., Hjelm, O., Kosson, D. S., Sawell, S. E., van der Sloot, H. & Vehlow, J., 1997. Municipal solid waste incinerator residues. Amsterdam: Elsevier Science, 973 s. ISBN 0-444-82563-0

Cheeseman, C. R., Makinde, A. & Bethanis, S., 2005. Properties of lightweight aggregate produced by rapid sintering of incinerator bottom ash. *Resources, Conservation and Recycling*, 43(2), S. 147–162.

Cristelo, N., Segadães, L., Coelho, J., Chaves, B., Sousa, N. R. & de Lurdes Lopes, M., 2020. Recycling municipal solid waste incineration slag and fly ash as precursors in low-range alkaline cements. *Waste Management*, 104, S. 60–73.

Destia, 2021. Kiviaines ja kiertotalous, Käyttökohteita [verkkodokumentti]. Vantaa: Destia. Saatavissa: <https://www.destia.fi/palvelut/kiviaines-ja-kiertotalous/kayttokohteita.html> [viitattu 24.3.2021]

de Vries, W., Rem, P.C. & Berkhout, S.P.M., 2014. ADR - a new method for dry classification. Saatavissa: [https://www.vivis.de/wp-content/uploads/WM4/2014\\_WM\\_329\\_344\\_de\\_Vries\\_Rem\\_Berkhout](https://www.vivis.de/wp-content/uploads/WM4/2014_WM_329_344_de_Vries_Rem_Berkhout) [viitattu 19.5.2021]

El-Jazairi, B. & Illston, J. M., 1977. A simultaneous semi-isothermal method of thermogravimetry and derivative thermogravimetry, and its application to cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 7(3), S. 247–257.

Euroopan Parlamentin ja Neuvoston direktiivi 2010/75/EU, annettu 24. marraskuuta 2010, teollisuuden päästöistä (yhtenäistetty ympäristön pilaantumisen ehkäiseminen ja vähentäminen) [2010] OJ L334/17

Giro-Paloma, J., Mañosa, J., Maldonado-Alameda, A., Quina, M. J., & Chimenos, J. M., 2019. Rapid sintering of weathered municipal solid waste incinerator bottom ash and rice husk for lightweight aggregate manufacturing and product properties. *Journal of Cleaner Production*, 232, S. 713-721.

Harju, I., Dettenborn, T., Forsman, J., Jyrävä, H. & Lahtinen, P., 2019. Kokemuksia uusiomateriaaleista tierakenteessa, Väyläviraston tutkimuksia 7/2019 [verkkodokumentti]. Helsinki: Väylävirasto. ISBN 978-952-317-678-2. Saatavissa: [https://julkaisut.vayla.fi/pdf12/vt\\_2019-07\\_kokemuksia\\_uusiomateriaaleista\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf12/vt_2019-07_kokemuksia_uusiomateriaaleista_web.pdf) [viitattu 6.5.2021]. 177 s.

Hasselriis, F. & Licata, A., 1996. Analysis of heavy metal emission data from municipal waste combustion. *Journal of Hazardous Materials*, 47(1-3), S. 77-102.

Hjelmar, O., 1996. Disposal strategies for municipal solid waste incineration residues. *Journal of Hazardous Materials*, 47(1-3), P. 345–368.

Illikainen, M., Tanskanen, P., Kinnunen, P., Körkkö, M., Peltosaari, O., Wigren, V., Österbacka, J., Talling, B. & Niinimäki, J., 2014. Reactivity and self-hardening of fly ash from the fluidized bed combustion of wood and peat. *Fuel*, 135, S. 69–75.

InfraRYL 2020/2, 2020. 21310.1 Sitomattoman kantavan kerroksen materiaalit [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://ryl.rakennustieto.fi/ryl/infraryl/2020\\_2/](https://ryl.rakennustieto.fi/ryl/infraryl/2020_2/) [viitattu 2.6.2021]

Izquierdo, M., Vazquez, E., Querol, X., Barra, M., López, A. & Plana, F., 2001. Use of bottom ash from municipal solid waste incineration as a road material [verkkodokumentti]. International Ash Utilization Symposium, Kentucky 22-24. lokakuuta 2001. 8 s. Saatavissa: <http://www.flyash.info/2001/conprod3/37izqu.pdf> [viitattu 20.4.2021]

Kaartinen, T., Laine-Ylijoki, J., Koivuhuhta, A., Korhonen, T., Luukkanen, S., Mörsky, P., Neitola, R., Punkkinen H. & Wahlström, M., 2010. Pohjakuonan jalostus uusiomateriaaliksi [verkkodokumentti]. Espoo: VTT. ISBN 978-951-38-7680-7. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2010/T2567.pdf> [viitattu 19.1.2021]. 115 s.

Kallesøe, J. & Dyhr-Jensen, S., 2018. Recovery of Resources in Bottom Ash – Semi Dry Concept. Teoksessa: Holm, O. & Thomé-Kozmiensky, E. (toim.) Removal, Treatment and Utilization of Waste Incineration Bottom Ash. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, S. 39-46. ISBN 978-3-944310-44-2

Kariya, J., Ryu, J. & Kato, Y., 2016. Development of thermal storage material using vermiculite and calcium hydroxide. *Applied Thermal Engineering*, 94, S. 186–192.



Keulen, A., van Zomeren, A., Harpe, P., Aarnink, W., Simons, H. A. E., Brouwers, H. J. H., 2016. High performance of treated and washed MSWI bottom ash granulates as natural aggregate replacement within earth-moist concrete. *Waste Management*, 49, S. 83 – 95.

Khachani, M., El Hamidi, A., Halim, M. & Arsalane, S., 2014. Non-isothermal kinetic and thermodynamic studies of the dehydroxylation process of synthetic calcium hydroxide  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . *Journal of Materials and Environmental Science*, 5(2), S. 615-624.

Kim, T. & Olek, J., 2012. Effects of Sample Preparation and Interpretation of Thermogravimetric Curves on Calcium Hydroxide in Hydrated Pastes and Mortars. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2290(1), S. 10–18.

Kiviniemi, O., Sikiö, J., Jyrävä, H., Ollila, S., Autiola, M., Ronkainen, M., Lindroos, N., Lahtinen, P. & Forsman J., 2012. Tuhkarakentaminen käsikirja – Energiantuotannon tuhkat väylä-, kenttä- ja maarakentamisessa [verkkodokumentti]. Luopioinen: Ramboll Finland Oy. Saatavissa: [https://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/images/2012--Ramboll--Tuhkarakentamisen\\_kasikirja.pdf](https://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/images/2012--Ramboll--Tuhkarakentamisen_kasikirja.pdf) [viitattu 6.5.2021]. 88 s.

KIVO, 2020. Jätevoimalat [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen Kiertovoima Ry. Saatavissa: <https://kivo.fi/ymmaramme/jatehuolto-ja-kiertotalous/jatevoimalat/> [viitattu 18.1.2021]

Kurda, R., Silva, R. V., & de Brito, J., 2020. Incorporation of Alkali-Activated Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ash in Mortar and Concrete: A Critical Review. *Materials*, 13(15).

Lahti Energia Oy, 2021. Energian tuotanto, Kymijärvi II [verkkodokumentti]. Lahti: Lahti Energia Oy. Saatavissa: <https://www.lahtienergia.fi/fi/lahti-energia/energian-tuotanto/kymijarvi-ii> [viitattu 1.6.2021]

Laine-Ylijoki, J., Mroueh, U-M., Vahanne, P., Wahlström, M., Vestola, E., Salonen, S. & Havukainen, J., 2005. Yhdyskuntajätteen termisen käsittelyn kuonista ja tuhista hyötykäytettäviä ja loppusijoitettavia tuotteita. Kansainvälinen esiselvitys

[verkkodokumentti]. Espoo: VTT. ISBN 951-38-6547-9. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2005/T2291.pdf> [viitattu 22.1.2021]. 92 s.

Lamers, F., 2015. Treatment of Bottom Ashes of Waste-to-Energy Installations – State of the Art. Teoksessa: Thomé-Kozmiensky, K. J. & Thiel, S. (toim.) Waste Management, Volume 5 Waste-to-Energy. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, S. 271-290. ISBN 978-3-944310-22-0

Li, Y., Hao, L. & Chen, X., 2016. Analysis of MSWI Bottom Ash Reused as Alternative Material for Cement Production. *Procedia Environmental Sciences*, 31, S. 549–553.

Lidelöw, S. & Lagerkvist, A., 2007. Evaluation of leachate emissions from crushed rock and municipal solid waste incineration bottom ash used in road construction. *Waste Management*, 27(10), S. 1356-1365.

Lin, K. L. & Lin, D. F., 2006. Hydration characteristics of municipal solid waste incinerator bottom ash slag as a pozzolanic material for use in cement. *Cement and Concrete Composites*, 28(9), S. 817–823.

Lynn, C. J., Ghataora, G. S. & Dhir OBE, R. K., 2017. Municipal incinerated bottom ash (MIBA) characteristics and potential for use in road pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(2), S. 185–201.

Maldonado-Alameda, À., Giro-Paloma, J., Alfocea-Roig, A., Formosa, J. & Chimenos, J. M., 2020a. Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash as Sole Precursor in the Alkali-Activated Binder Formulation. *Applied Sciences*, 10(12).

Maldonado-Alameda, A., Giro-Paloma, J., Svobodova-Sedlackova, A., Formosa, J. & Chimenos, J. M., 2020b. Municipal solid waste incineration bottom ash as alkali-activated cement precursor depending on particle size. *Journal of Cleaner Production*, 242.

MARA-asetus, Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 843/2017. Annettu Helsingissä 7.12.2017. Saatavissa sähköisesti osoitteessa <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170843>

Matinlauri, S., Rossi, J., Kalliainen, A. & Kolisoja, P., 2016. Vaihtoehtoisia maarakennusmateriaaleja sisältävien tie- ja katurakenteiden vaurioituminen [verkkodokumentti]. Helsinki: Liikennevirasto. ISBN 978-952-317-340-8. Saatavissa: [https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts\\_2016-](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2016-52_vaihtoehtoisia_maarakennusmateriaaleja_web.pdf)

52\_vaihtoehtoisia\_maarakennusmateriaaleja\_web.pdf [viitattu 7.5.2021]. 177 s.

Mineralz, 2021. Producten & diensten, FORZ® Toeslagmateriaal [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.mineralz.com/producten-en-diensten/forz/forz-toeslagmateriaal> [viitattu 2.6.2021]

Monteiro, R. C. C., Alendouro, S. J. G., Figueiredo, F. M. L., Ferro, M. C. & Fernandes, M. H. V., 2006. Development and properties of a glass made from MSWI bottom ash. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 352(2), S. 130–135.

Nørgaard, K.P., Hyks, J., Mulvad, J.K., Frederiksen, J.O. & Hjelm, O., 2019. Optimizing large-scale ageing of municipal solid waste incinerator bottom ash prior to the advanced metal recovery: Phase I: Monitoring of temperature, moisture content, and CO<sub>2</sub> level. *Waste Management*, 85, S. 95-105.

Odler, I., 1998. Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement. Teoksessa: Hewlett, P. C. (toim.) *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. 4 painos. Lontoo: Arnold, S. 241-297. ISBN 0 340 56589 6

Olsson, S., Gustafsson, J. P., Berggren Kleja, D., Bendz, D. & Persson, I., 2009. Metal leaching from MSWI bottom ash as affected by salt or dissolved organic matter. *Waste Management*, 29(2), S. 506–512.

Ott, E. & Kempfert, H.G., 2003. Soil mechanical properties of bottom-ash from municipal solid waste incineration. Teoksessa: Vaníček, I., Barvínek, R., Boháč, J., Jettmar, J., Jirásko, D. & Salák, J. (toim.) *XIII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Geotechnical Problems With Man-Made and Man Influenced Grounds, Volume 1*. Praha: Czech Geotechnical Society CICE, S. 195-198. ISBN 80-86769-00-3.

Pan, J., Huang, C., Kuo, J-J., Lin, S-H., 2008. Recycling MSWI bottom and fly ash as raw materials for Portland cement. *Waste Management*, 28(7), S. 1113 – 1118.

Pöyry Management Consulting Oy, 2015. Energiateollisuus Ry – Jätteiden energiahöydyntäminen Suomessa [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://energia.fi/files/405/ET\\_Jatteiden\\_energiakaytto\\_Loppuraportti\\_161015.pdf](https://energia.fi/files/405/ET_Jatteiden_energiakaytto_Loppuraportti_161015.pdf) [viitattu 18.1.2021]. 39 s.

Qiao, X. C., Tyrer, M., Poon, C. S. & Cheeseman, C. R., 2008. Novel cementitious materials produced from incinerator bottom ash. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(3), S. 496–510.

Rendek, E., Ducom, G. & Germain, P., 2007. Influence of waste input and combustion technology on MSWI bottom ash quality. *Waste Management*, 27(10), S. 1403–1407.

Ribbing, C., 2007. Environmentally friendly use of non-coal ashes in Sweden. *Waste Management*, 27(10), S. 1428–1435.

Riikinhoima Oy, 2021. Voimalaitos [verkkodokumentti]. Varkaus: Riikinhoima Oy. Saatavissa: <https://riikinhoima.fi/voimalaitos/> [viitattu 1.6.2021]

Sabbas, T., Poletini, A., Pomi, R., Astrup, T., Hjelm, O., Mostbauer, P., Cappai, G., Magel, G., Salhofer, S., Speiser, C., Heuss-Assbichler, S., Klein, R. & Lechner, P., 2003. Management of municipal solid waste incineration residues. *Waste Management*, 23(1), S. 61–88.

Sarkkinen, M., Kemppainen, K., Kujala, K. & Gehör, S., 2015. Biopolton lentotuhkat, uudet symbioosisuotteet ja käyttösovellukset (Geosynergy). Kajaani: Kajaanin ammattikorkeakoulu, 53 s. ISBN 978-952-9853-93-9

Schmelzer, G., 1995. Separation of metals from waste incineration residue by application of mineral processing. Teoksessa: Herbst, J. A. (toim.) *Proceedings of the XIX International Mineral Processing Congress, Vol. 4: Precious metals processing and mineral waste and the environment*, San Francisco 22-27 lokakuuta 1995. Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. S. 137-140.

SFS-EN 1097-6, 2014. Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 6: Kiintötiheyden ja vedenimukyvyyn määrittäminen. 2. painos. Suomen standardisoimisliitto SFS: 47+ 4 s.

SFS-EN 197-1, 2012. Sementti. Osa 1: Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus. 3. painos. Suomen standardisoimisliitto SFS: 36+ 8 s.

Shim, Y.-S., Kim, Y.-K., Kong, S.-H., Rhee, S.-W., & Lee, W.-K., 2003. The adsorption characteristics of heavy metals by various particle sizes of MSWI bottom ash. *Waste Management*, 23(9), S. 851–857.

Sjöberg, M., Kolisoja, P., Kuula, P., Leppänen, M., Ketola, T., Koivisto, K., Forsman, J., Ronkainen, M., Dettenborn, T. & Jyrävä, H., 2016a. Selvitys joidenkin UUMA-materiaalien teknisen kelpoisuuden arviointiin liittyvistä testausstandardeista ja menetelmistä [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/images/Standardiselvitys\\_loppuraportti%202016\\_05\\_24.pdf](https://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/images/Standardiselvitys_loppuraportti%202016_05_24.pdf) [viitattu 12.5.2021] 34 s.

Sjöberg, M., Kolisoja, P., Kuula, P., Leppänen, M., Ketola, T., Koivisto, K., Forsman, J., Ronkainen, M., Dettenborn, T. & Jyrävä, H., 2016b. Standardiselvityksen liitteet 3...22 [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/images/Standardiselvitys%20-%20Liitteet%203-22\\_A3%202016-05-24.pdf](https://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/images/Standardiselvitys%20-%20Liitteet%203-22_A3%202016-05-24.pdf) [viitattu 12.5.2021]. 47 s.

Sorlini, S., Collivignarelli, M. C. & Abbà, A., 2017. Leaching behaviour of municipal solid waste incineration bottom ash: From granular material to monolithic concrete. *Waste Management & Research*, 35(9), S. 978–990.

Sormunen, L. A. & Kolisoja, P., 2017. Construction of an interim storage field using recovered municipal solid waste incineration bottom ash: Field performance study. *Waste Management*, 64, S. 107-116.

Sormunen A., 2015. Jätteenpolton kuonien hyötykäyttökokemuksia – 10.9.2015 UUMA2-vuosiseminaari [verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/Annika%20Sormunen\\_Suomen%20erityisj%C3%A4te.pdf](https://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/Annika%20Sormunen_Suomen%20erityisj%C3%A4te.pdf) [viitattu 11.5.2021]

Sormunen, A., Kanninen T., Salo, T. & Rantsi, R., 2016. Innovative use of recovered municipal solid waste incineration bottom ash as a component in growing media. *Waste Management & Research*, 34(7), S. 595–604.

Speiser, C., Baumann, T. & Niessner, R., 2000. Morphological and Chemical Characterization of Calcium-Hydrate Phases Formed in Alteration Processes of Deposited Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ash. *Environmental Science & Technology*, 34(23), S. 5030–5037.

Suomen Erikoisjäte Oy, 2021. Palvelut & tuotteet, Scanwas-tuotteet [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.erityisjate.fi/palvelut-ja-tuotteet/scanwas-tuotteet/> [viitattu 2.6.2021]

Suomen Kiertovoima Ry, 2020. Koostumustietopankki [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen Kiertovoima Ry. Saatavissa: <https://kivo.fi/ymmaramme/koostumustietopankki/> [viitattu 23.4.2021]

Suomen virallinen tilasto (SVT), 2020. Jätetilasto - Yhdyskuntajätteet 2019 [verkkodokumentti]. Helsinki: Tilastokeskus. ISSN=1798-3339. Saatavissa: [http://www.stat.fi/til/jate/2019/13/jate\\_2019\\_13\\_2020-12-09\\_tie\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/jate/2019/13/jate_2019_13_2020-12-09_tie_001_fi.html) [viitattu 18.1.2021]

Stockinger, G., 2018. Direct Wet Treatment of Fresh, Wet-Discharged Grate Ash from a Waste Incineration Plant. Teoksessa: Holm, O. & Thomé-Kozmiensky, E. (toim.) Removal, Treatment and Utilization of Waste Incineration Bottom Ash. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, S. 47-52. ISBN 978-3-944310-44-2

Šyc, M., Simon, F. G., Biganzoli, L., Grosso, M. & Hykš, J., 2018. Resource Recovery from Incineration Bottom Ash: Basics, Concepts, Principles. Teoksessa: Holm, O. & Thomé-Kozmiensky, E. (toim.) Removal, Treatment and Utilization of Waste Incineration Bottom Ash. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, S. 1-10. ISBN 978-3-944310-44-2

Šyc, M., Simon, F. G., Hykš, J., Braga, R., Biganzoli, L., Costa, G., Funari, V. & Grosso, M., 2020. Metal recovery from incineration bottom ash: State-of-the-art and recent developments. *Journal of Hazardous Materials*, 393.

Taylor, H.F.W., 1997. Cement chemistry. 2 painos. Lontoo: Thomas Telford Publishing, 459 s. ISBN 0 7277 2592 0

Tiehallinto, 2007. Päällysrakenteen stabilointi [verkkodokumentti]. Helsinki: Edita Prima Oy. ISBN 978-951-803-971-9. Saatavissa: [https://julkaisut.vayla.fi/thohje/pdf/2100055-v-07paallysrakenteen\\_stabilointi.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/thohje/pdf/2100055-v-07paallysrakenteen_stabilointi.pdf) [viitattu 11.5.2021]. 72 s.

Ukrainczyk, N., Ukrainczyk, M., Šipušić, J. & Matusinović, T., 2006. XRD and TGA investigation of hardened cement paste degradation [verkkodokumentti]. 11th Conference on Materials, Processes, Friction and Wear, Vela Luka 22-24 kesäkuuta 2006. Saatavissa: <https://bib.irb.hr/datoteka/261303.261303.Ukrainczyk06.pdf.pdf> [viitattu 16.6.2021]

Van Gerven, T., Van Keer, E., Arickx, S., Jaspers, M., Wauters, G. & Vandecasteele, C., 2005. Carbonation of MSWI-bottom ash to decrease heavy metal leaching, in view of recycling. Waste Management, 25(3), S. 291–300.

Vesanto, P., 2006. Jätteenpolton parhaan käytettävissä olevan tekniikan (BAT) vertailuasiakirjan käyttö suomalaisessa toimintaympäristössä - Jätteenpolton BREF 2006 [verkkodokumentti]. Helsinki: Edita Prima Oy. ISBN 952-11-2309-5. Saatavissa: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38712/SY\\_27\\_2006.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38712/SY_27_2006.pdf?sequence=3&isAllowed=y) [viitattu 19.1.2021]. 104 s.

Viirola, H. & Raivio, P., 2000. Portlandsementin hydrataatio [verkkodokumentti]. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). ISBN 951-38-5763-8. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2000/T2041.pdf> [viitattu 22.5.2021]. 65 s.

Väylävirasto, 2020a. Uusiomateriaalien käyttö väylärakentamisessa, Väyläviraston ohjeita 6/2020 [verkkodokumentti]. Helsinki: Väylävirasto. Saatavissa: [https://julkaisut.vayla.fi/pdf11/vo\\_2020-06\\_uusiomateriaalien\\_kaytto\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf11/vo_2020-06_uusiomateriaalien_kaytto_web.pdf) [viitattu 24.6.2021]. 66 s.

Väylävirasto, 2020b. Uusiomateriaalit tierakenteessa, Luonnos 14.5.2020 [verkkodokumentti]. Helsinki: Väylävirasto. Saatavissa: <https://sgy.fi/wp->

content/uploads/2020/05/opas\_uusiomateriaalit-tierakenteissa\_luonnos\_14-5-2020.pdf [viitattu 11.5.2021]. 52 s.

Wiles, C. C., 1996. Municipal solid waste combustion ash: state-of-the-knowledge. *Journal of Hazardous Materials*. 47(1-3), S. 325–344.

Wiles, C. C. & Shepherd, P., 1999. Beneficial Use and Recycling of Municipal Waste Combustion Residues - A Comprehensive Resource Document [verkkodokumentti]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory. NREL/BK-570-25841. Saatavissa: <https://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25841.pdf> [viitattu 1.6.2021]. 143 s.

Zhu, W., Chen, X., Struble, L. J. & Yang, E.-H., 2018. Characterization of calcium-containing phases in alkali-activated municipal solid waste incineration bottom ash binder through chemical extraction and deconvoluted Fourier transform infrared spectra. *Journal of Cleaner Production*, 192, S. 782–789.

Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., Yu, W.H. & Wang, H., 2016. Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. *Journal of Cleaner Production*, 125, S. 253–26.



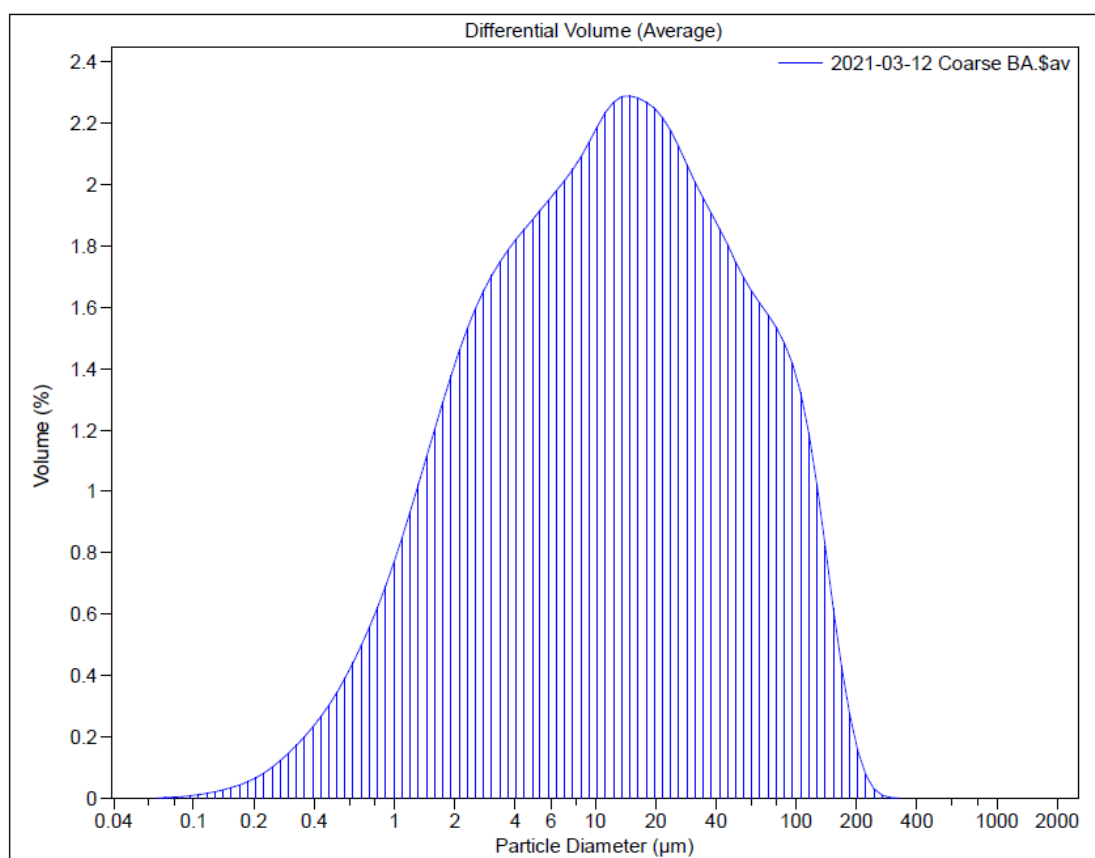
Liite 1. XRD-analyysin mittausparametrit.

**Measurement conditions**

X-Ray (Cobalt anode)	Rotating 40 kV , 135 mA	Scan speed / time	Duration 4.0628 deg/min
Goniometer	SmartLab(In-plane)	Step width	0.0200 deg
Attachment	XY-20mm	Scan axis	Theta/2-Theta
Filter	Cu_K-beta	Scan range	5.0000 - 130.0000 deg
CBO selection slit	BB (Bragg-Brentano geometry)	Incident slit	0.500deg
Diffrected beam mono.	None	Length limiting slit	10.0mm
Detector	D/teX Ultra 250	Receiving slit #1	20.000mm
Scan mode	CONTINUOUS	Receiving slit #2	20.000mm

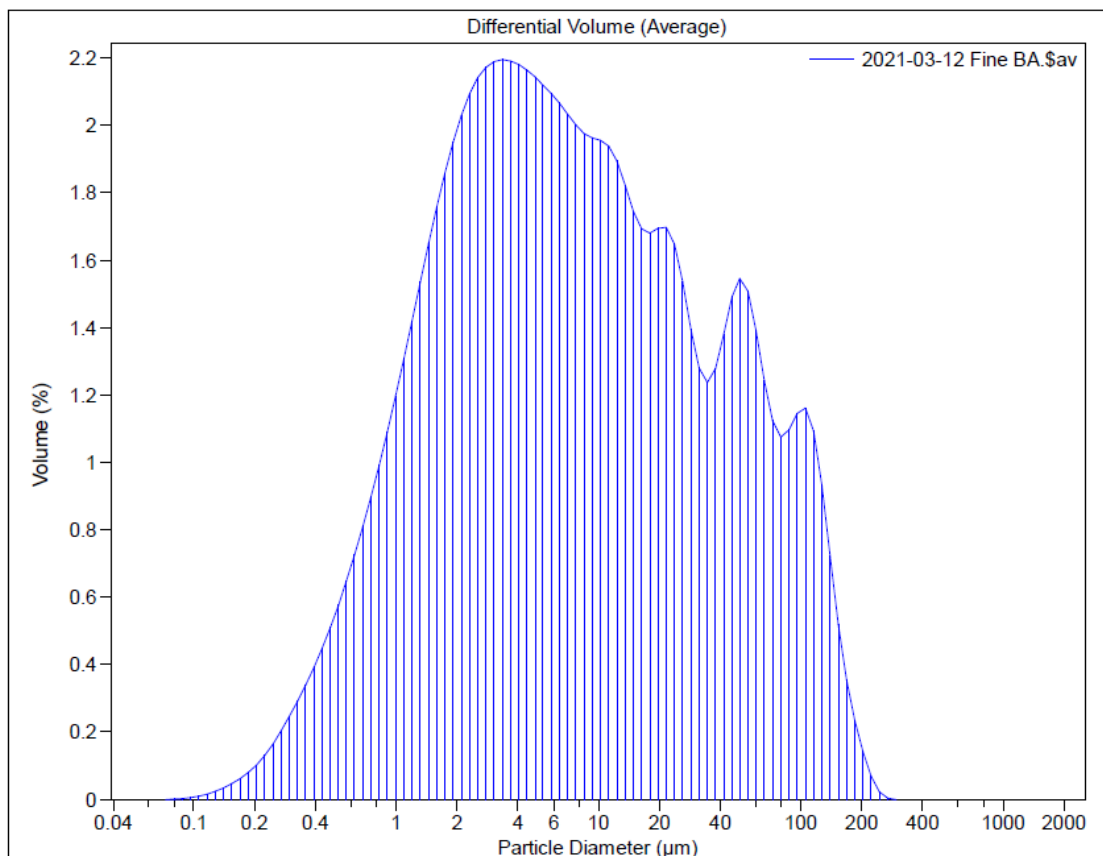
## Liite 2. Jauhetun karkean ja hienon pohjakuonan partikkelikokojakauma.

Volume Statistics (Arithmetic)			2021-03-12 Coarse BA.\$av				
Calculations from 0.040 μm to 2000 μm							
Volume:	100%			S.D.:	35.99 μm		
Mean:	27.13 μm			Variance:	1295 μm²		
Median:	12.04 μm			C.V.:	133%		
Mean/Median ratio:	2.252			Skewness:	2.144 Right skewed		
Mode:	14.94 μm			Kurtosis:	4.979 Leptokurtic		
Specific Surf. Area:	16279 cm²/mL						
<10%	<25%	<50%	<75%	<80%	<90%	<95%	<99%
1.504 μm	3.772 μm	12.04 μm	34.97 μm	44.79 μm	78.31 μm	108.2 μm	160.7 μm
<20 μm	<32 μm	<45 μm	<63 μm	<90 μm	<100 μm	<180 μm	<250 μm
62.4%	73.1%	80.1%	86.3%	92.3%	93.9%	99.5%	99.98%



Kuva 19. Jauhetun karkean pohjakuonan partikkelikokojakauma.

Volume Statistics (Arithmetic)		2021-03-12 Fine BA.\$av					
Calculations from 0.040 μm to 2000 μm							
Volume:	100%						
Mean:	22.26 μm	S.D.:	34.40 μm				
Median:	6.993 μm	Variance:	1184 μm <sup>2</sup>				
Mean/Median ratio:	3.183	C.V.:	155%				
Mode:	3.358 μm	Skewness:	2.439 Right skewed				
Specific Surf. Area:	22794 cm <sup>2</sup> /mL	Kurtosis:	6.377 Leptokurtic				
<10%	<25%	<50%	<75%	<80%	<90%	<95%	<99%
1.043 μm	2.358 μm	6.993 μm	24.92 μm	35.01 μm	68.09 μm	103.3 μm	156.4 μm
<20 μm	<32 μm	<45 μm	<63 μm	<90 μm	<100 μm	<180 μm	<250 μm
71.0%	78.8%	83.6%	89.0%	93.3%	94.6%	99.6%	99.99%



Kuva 20. Jauhetun hienon pohjakuonan partikkelikokojakauma.

Liite 3. Karkean ja hienon pohjakuonan tiheys.

Taulukko 10. Tutkittujen pohjakuonien tiheydet. Taulukossa d 1-5 tarkoittaa laitteiston tekemiä mittauksia (yhteensä viisi mittausta per näyte), s tarkoittaa keskihajontaa ja ka keskiarvoa.

Näyte	Karkea kuona alkuperäinen		Karkea kuona hienonnettu		Hieno kuona alkuperäinen		Hieno kuona hienonnettu	
m (g)	7,786	7,8658	4,8657	4,4066	6,0928	5,8487	5,1177	5,3808
t (°C)	23,2	24	23,6	24,2	23,5	24	23,8	24,3
d 1	2,803	2,7413	2,807	2,816	2,771	2,7591	2,7808	2,7766
d 2	2,8014	2,7392	2,8061	2,8161	2,7729	2,7585	2,7785	2,7745
d 3	2,8001	2,7383	2,8056	2,8127	2,7686	2,76	2,7769	2,7748
d 4	2,8003	2,7385	2,8044	2,8133	2,7702	2,7568	2,7789	2,7773
d 5	2,7997	2,7385	2,8044	2,8121	2,767	2,7559	2,7716	2,7724
ka (g/cm <sup>3</sup> )	2,8009	2,7392	2,8055	2,8140	2,7699	2,7581	2,7773	2,7751
s	0,0012	0,0011	0,001	0,0017	0,002	0,0015	0,0031	0,0017
ka (g/cm <sup>3</sup> )	2,7700		2,8098		2,7640		2,7762	

Liite 4. Karkean ja hienon pohjakuonan kemiallinen koostumus.

Taulukko 11. Pohjakuonissa esiintyneet alkuaineet. Tulokset on esitetty massaprosentteina.

Alkuaine	Karkea pohjakuona (%)	Hieno pohjakuona (%)
O	40,1367	36,8295
Na	4,0925	2,928
Mg	1,1925	1,153
Al	4,6893	5,5737
Si	20,4521	15,606
P	0,4478	0,6691
S	0,5486	1,04
Cl	0,2237	0,3444
K	0,9723	0,8372
Ca	10,9037	13,1057
Ti	0,5854	0,7106
Cr	0,0784	0,0929
Mn	0,1245	0,1415
Fe	8,8102	8,528
Co	0,0059	0,0075
Ni	0,0345	0,0369
Cu	0,4403	0,3132
Zn	0,3207	0,5573
Se	0,0023	n/a
Rb	0,0071	n/a
Sr	0,0353	0,0373
Zr	0,0306	0,0236
Sn	0,0324	n/a
Ba	0,1628	0,1713
Pb	0,0902	0,0377

Liite 5. XRD-tulokset paljaalle hienolle pohjakuonalle.

## Quantitative Analysis Results (WPPF)

### General information

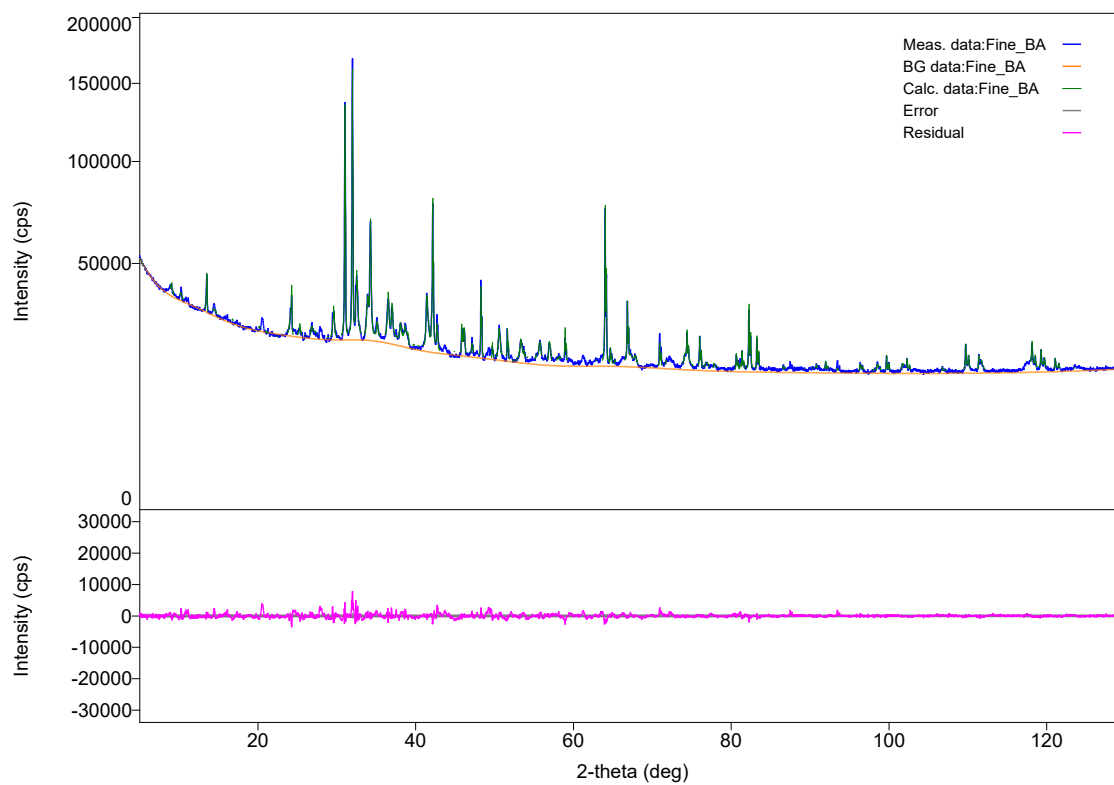
Analysis date	2021/06/16 08:29:35	Measurement date	2021/03/31 07:51:39
Sample name	Fine_BA	Operator	administrator
File name	Fine_BA.ras		
Comment			

### Qualitative analysis results

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Rutile	Ti O <sub>2</sub>	0.389	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-003-0648
a-Si O <sub>2</sub> , quartz, syn	Si O <sub>2</sub>	0.973	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-005-4718
Calcite, syn	Ca ( C O <sub>3</sub> )	1.092	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-007-8659
Iron Oxide	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	1.005	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-013-9810
Xonotlite-M2a2bc, deuterated, syn	Ca <sub>6</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>17</sub> ( O D ) <sub>2</sub>	1.570	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-016-9192
Gypsum	Ca ( S O <sub>4</sub> ) ( H <sub>2</sub> O ) <sub>2</sub>	0.971	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-009-3817
Silicon Oxide	Si O <sub>2</sub>	1.410	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-010-4043
Magnesium Titanium Oxide	Mg <sub>0.6</sub> Ti <sub>2.4</sub> O <sub>5</sub>	2.854	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-007-6626
Oldhamite, syn	Ca S	1.420	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-021-2705

### Weight ratio

	Phase name	Content(%)
-	Rutile	10.0(5)
-	a-Si O <sub>2</sub> , quartz, syn	4.3(2)
-	Calcite, syn	4.7(3)
-	Iron Oxide	3.17(17)
-	Xonotlite-M2a2bc,	9.3(5)
-	Gypsum	2.7(2)
-	Silicon Oxide	1.21(11)
-	Magnesium Titanium	0(3)
-	Oldhamite, syn	1.77(12)
-	Unknown	63(2)

**Measurement profile**

Liite 6. XRD-tulokset paljaalle karkealle pohjakuonalle.

## Quantitative Analysis Results (WPPF)

### General information

Analysis date	2021/06/18 09:27:23	Measurement date	2021/03/31 08:26:20
Sample name	Course_BA	Operator	administrator
File name	Course_BA.ras		
Comment			

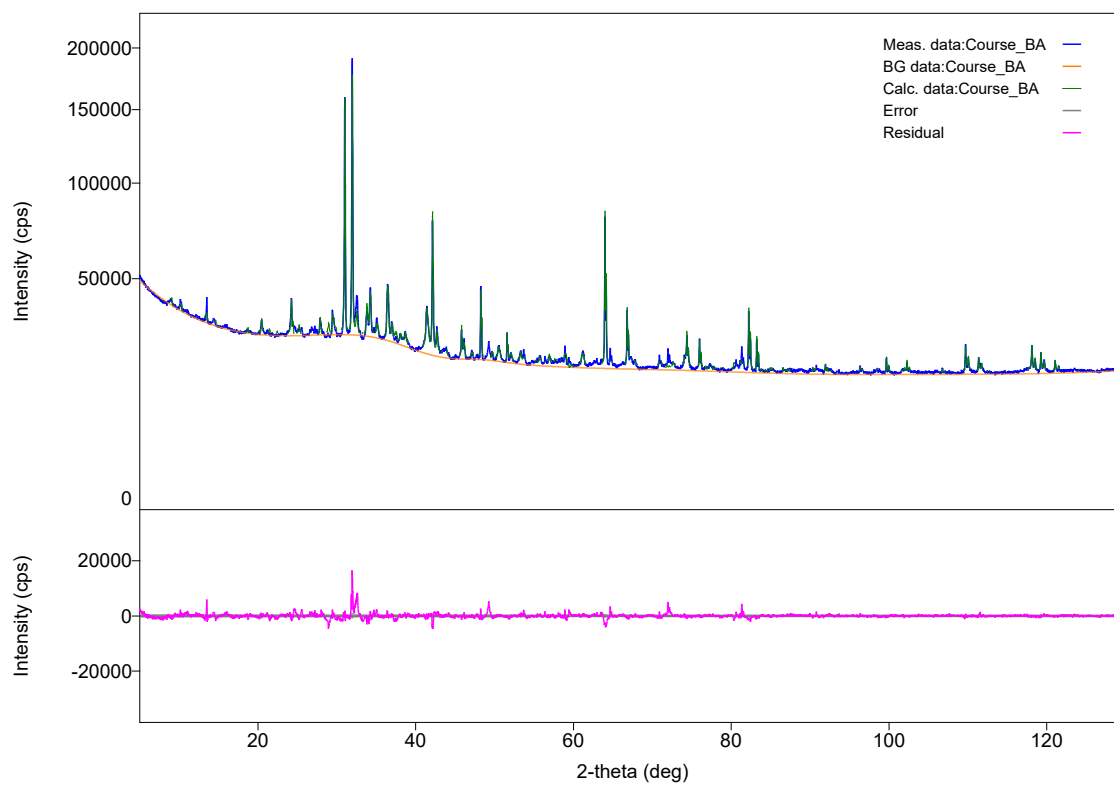
### Qualitative analysis results

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Rutile	Ti O <sub>2</sub>	0.368	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-003-0648
a-Si O <sub>2</sub> , quartz, syn	Si O <sub>2</sub>	0.698	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-005-4718
Calcite, syn	Ca ( C O <sub>3</sub> )	1.230	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-007-8659
Iron Oxide	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	1.249	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-013-9810
Xonotlite-M2a2bc, deuterated, syn	Ca <sub>6</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>17</sub> ( O D ) <sub>2</sub>	1.584	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-016-9192
Gypsum	Ca ( S O <sub>4</sub> ) ( H <sub>2</sub> O ) <sub>2</sub>	1.507	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-009-3817
Silicon Oxide	Si O <sub>2</sub>	1.698	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-010-4043
Magnesium Titanium Oxide	Mg <sub>0.6</sub> Ti <sub>2.4</sub> O <sub>5</sub>	1.898	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-007-6626
Oldhamite, syn	Ca S	2.757	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-021-2705
Akermanite	Na <sub>0.51</sub> Ca <sub>1.53</sub> Mg <sub>0.39</sub> Fe <sub>0.16</sub> Al <sub>0.41</sub> ( Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )	1.353	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-015-2994

### Weight ratio

	Phase name	Content(%)
-	Rutile	10.00(12)
-	a-Si O <sub>2</sub> , quartz, syn	5.10(17)
-	Calcite, syn	1.03(10)
-	Iron Oxide	3.02(11)
-	Xonotlite-M2a2bc,	5.3(2)
-	Gypsum	0.74(15)
-	Silicon Oxide	0.51(9)
-	Magnesium Titanium	1.17(8)
-	Oldhamite, syn	0.31(4)
-	Akermanite	3.98(19)
-	Unknown	68.9(4)



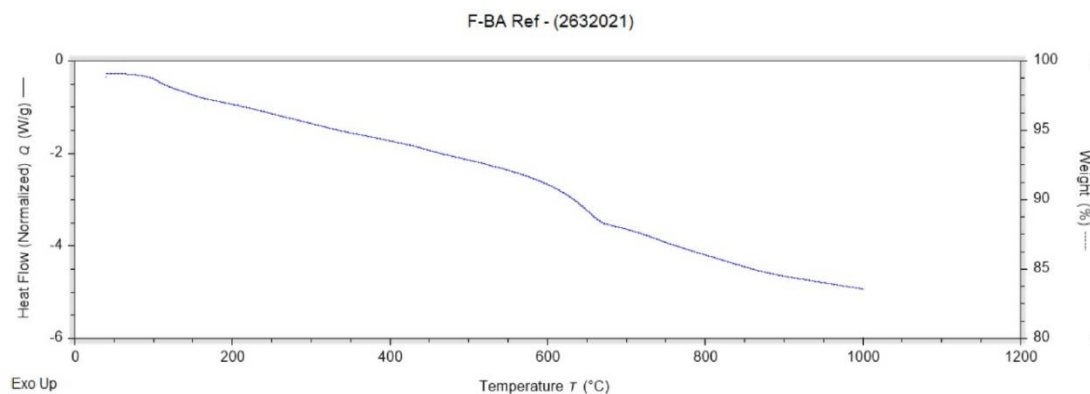
**Measurement profile**

Liite 7. TGA-laskuissa käytetyt data-arvot.

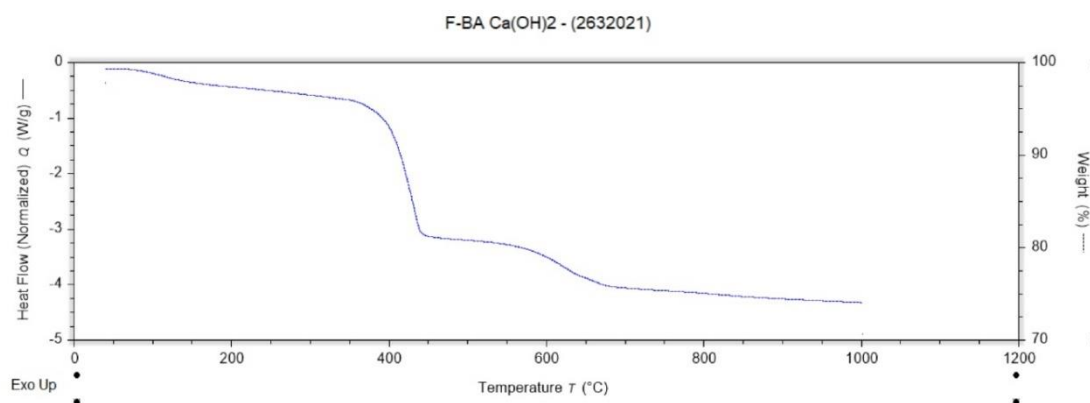
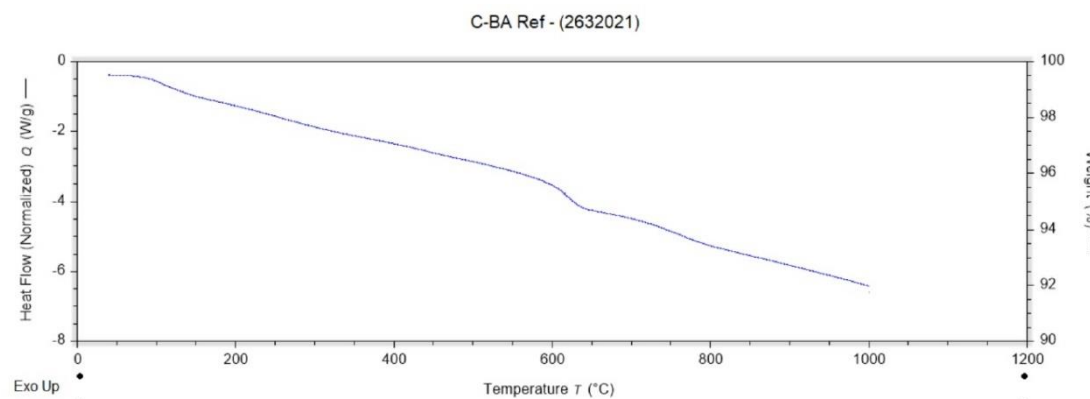
Taulukko 12. TGA-analyysissa saadut tulokset näytteen painolle (%) eri lämpötiloissa.

Lämpötila (°C)	Paljas hieno kuona	Hieno kuona + $\text{Ca(OH)}_2$	Paljas karkea kuona	Karkea kuona + $\text{Ca(OH)}_2$
100	98,71	98,837	99,301	98,929
200	96,873	97,375	98,415	97,853
350	94,816	95,962	97,334	96,871
450	93,555	81,241	96,728	82,333
600	91,095	79,001	95,565	80,461
700	87,872	75,612	94,404	77,901

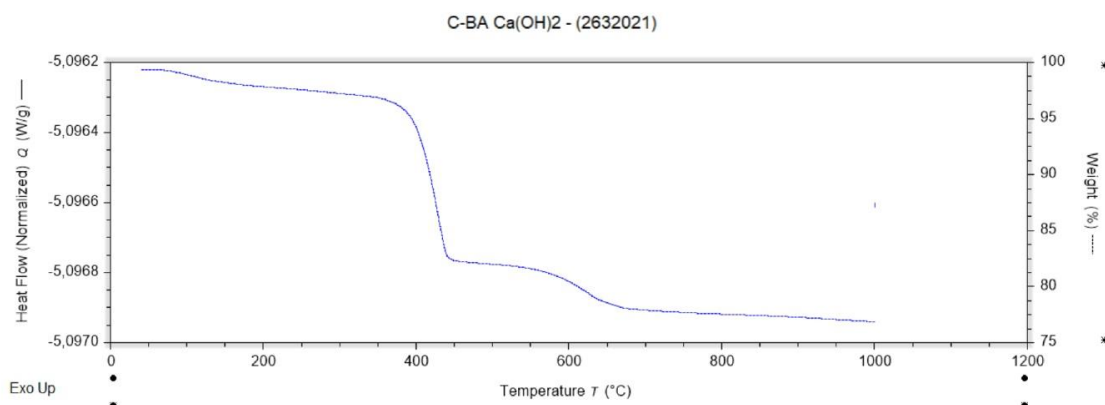
## Liite 8. Näytteiden TGA-kuvaajat.



Kuva 21. TGA-kuvaaja paljaalle hienolle pohjakuonalle.

Kuva 22. TGA-kuvaaja hieno pohjakuona + Ca(OH)<sub>2</sub> -näytteelle.

Kuva 23. TGA-kuvaaja paljaalle karkealle pohjakuonalle.



Kuva 24. TGA-kuvaaja karkea pohjakuona + Ca(OH)<sub>2</sub> -näytteelle.

## Liite 9. Toisen vaiheen koekappaleiden märkä- ja kuivapainot sekä absorptiotulokset.

Taulukko 13. Hieno pohjakuona + kalsiumhydroksidi näytteiden märkäpainot (g).

Näyte	FCa2	FCa4	FCa6	FCa8	FCa10
1	16,73	18,20	16,86	17,45	17,92
2	15,25	17,38	17,18	16,83	17,19
3	16,44	16,88	17,44	17,48	17,65

Taulukko 14. Hieno pohjakuona + kalsiumhydroksidi näytteiden kuivapainot (g).

Näyte	FCa2	FCa4	FCa6	FCa8	FCa10
1	11,45	12,68	11,77	12,28	12,58
2	10,48	12,14	11,99	11,79	12,03
3	11,38	11,79	12,19	12,28	12,45

Taulukko 15. Hieno pohjakuona + kalsiumhydroksidi näytteiden absorptioarvot (%).

Näyte	FCa2	FCa4	FCa6	FCa8	FCa10
1	46,11	43,53	43,25	42,10	42,45
2	45,52	43,16	43,29	42,75	42,89
3	44,46	43,17	43,07	42,35	41,78
keskiarvo	45,36	43,29	43,20	42,40	42,37

Taulukko 16. Hieno pohjakuona + sementti näytteiden märkäpainot (g).

Näyte	FCe2	FCe4	FCe6	FCe8	FCe10
1	17,30	16,85	16,33	16,44	16,92
2	17,36	16,48	16,80	17,25	17,04
3	17,26	16,21	16,90	16,67	17,06

Taulukko 17. Hieno pohjakuona + sementti näytteiden kuivapainot (g).

Näyte	FCe2	FCe4	FCe6	FCe8	FCe10
1	11,84	11,62	11,40	11,58	12,07
2	11,86	11,31	11,79	12,17	12,22
3	11,86	11,23	11,87	11,70	12,27

Taulukko 18. Hieno pohjakuona + sementti näytteiden absorptioarvot (%).

Näyte	FCe2	FCe4	FCe6	FCe8	FCe10
1	46,11	45,00	43,25	41,97	40,18
2	46,37	45,71	42,46	41,74	39,44
3	45,53	44,35	42,38	42,48	39,04
keskiarvo	46,00	45,02	42,70	42,06	39,55

Liite 10. XRD-tulokset koekappaleelle 2 % Ca(OH)<sub>2</sub> lisäyksellä.

## Quantitative Analysis Results (WPPF)

### General information

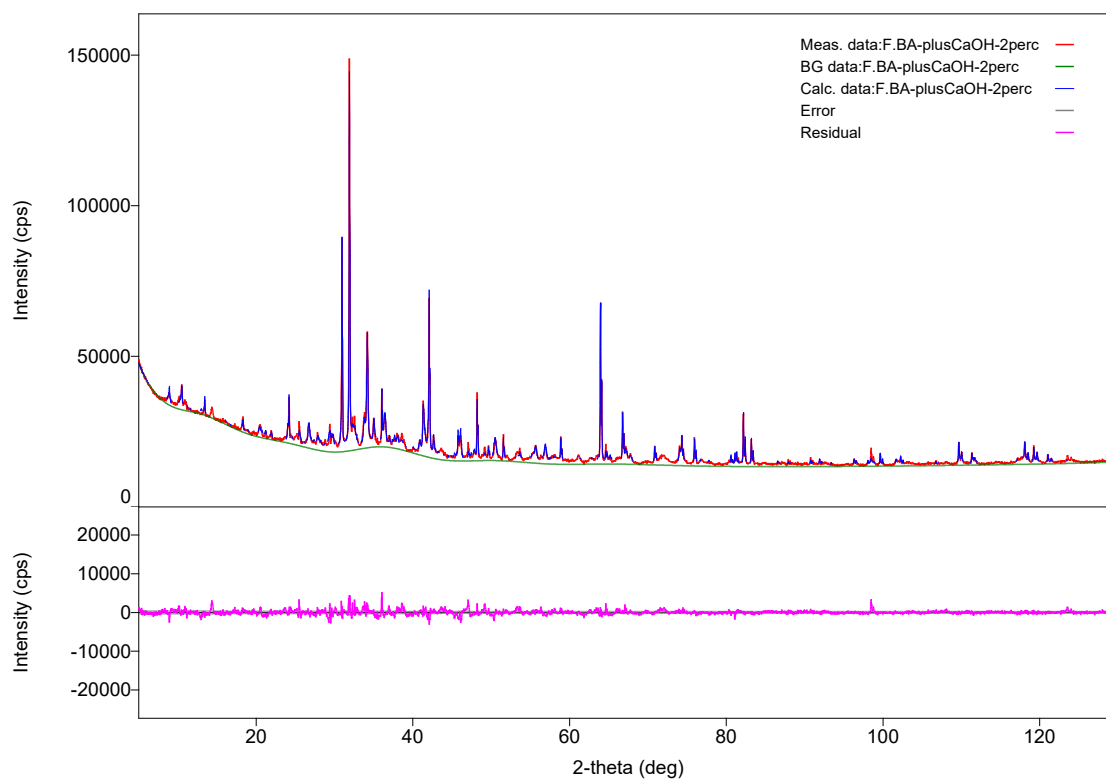
Analysis date	2021/06/10 11:42:00		
Sample name	F.BA-plusCaOH-2perc	Measurement date	2021/05/27 11:25:02
File name	F.BA-plusCaOH-2perc.ras	Operator	administrator
Comment			

### Qualitative analysis results

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Albite/anorthite high	Na <sub>0.793</sub> Ca <sub>0.207</sub> Al <sub>1.21</sub> Si <sub>2.79</sub> O <sub>8</sub>	1.836	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-024-2150
Tobermorite	Ca <sub>2.25</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>7.5</sub> (O H) <sub>1.5</sub> (H <sub>2</sub> O)	1.531	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-014-8455
Fedotovite	K <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> (S O <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> O	2.085	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-012-5395
calcium hydridodeuterioaluminate sulfate(VI) deuteriohydrate *, ettringite, deuterated, syn	Ca <sub>6</sub> (Al (O D <sub>0.962</sub> H <sub>0.038</sub> ) <sub>6</sub> ) <sub>2</sub> (S O <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (O D <sub>0.962</sub> H <sub>0.038</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>25.5</sub>	1.564	ICDD (PDF-4+ 2021)	01-074-9855
Hydrocalumite	Ca <sub>8</sub> Al <sub>4</sub> (C O <sub>3</sub> ) Cl <sub>2</sub> (O H) <sub>24</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>9.6</sub>	1.685	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-014-9938
Magnetite, bearing	Ti-Fe (Fe <sub>1.04</sub> Ti <sub>0.67</sub> ) O <sub>4</sub>	2.812	ICDD (PDF-4+ 2021)	01-071-6448
Gypsum, syn	Ca (S O <sub>4</sub> ) (H <sub>2</sub> O) <sub>2</sub>	1.546	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-008-9805
magnetite, syn	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	1.550	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-018-0091
karrooite, syn	Mg Ti <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3.055	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-014-4767
Alumoakermanite	Na <sub>0.5</sub> Ca <sub>1.5</sub> Mg <sub>0.2</sub> Fe <sub>0.3</sub> Al <sub>0.5</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )	1.503	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-023-1467
Rutile, syn	Ti O <sub>2</sub>	0.372	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-005-4625
a-Si O <sub>2</sub> , quartz, syn	Si O <sub>2</sub>	0.849	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-005-4718
Calcium Carbonate	Ca (C O <sub>3</sub> )	0.933	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-023-8700

**Weight ratio**

	Phase name	Content(%)
-	Albite/anorthite high	9.6(4)
-	Tobermorite	1.53(10)
-	Fedotovite	1.8(3)
-	calcium	2.75(15)
-	Hydrocalumite	3.18(14)
-	Magnetite, Ti-bearing	0.06(2)
-	Gypsum, syn	0.96(8)
-	magnetite, syn	2.99(8)
-	karrooite, syn	5.1(3)
-	Alumoakermanite	3.20(17)
-	Rutile, syn	10.0(2)
-	a-Si O <sub>2</sub> , quartz, syn	4.63(10)
-	Calcium Carbonate	6.47(15)
-	Unknown	47.8(10)

**Measurement profile**



Liite 11. XRD-tulokset koekappaleelle 6 % Ca(OH)<sub>2</sub> lisäyksellä.

## Quantitative Analysis Results (WPPF)

### General information

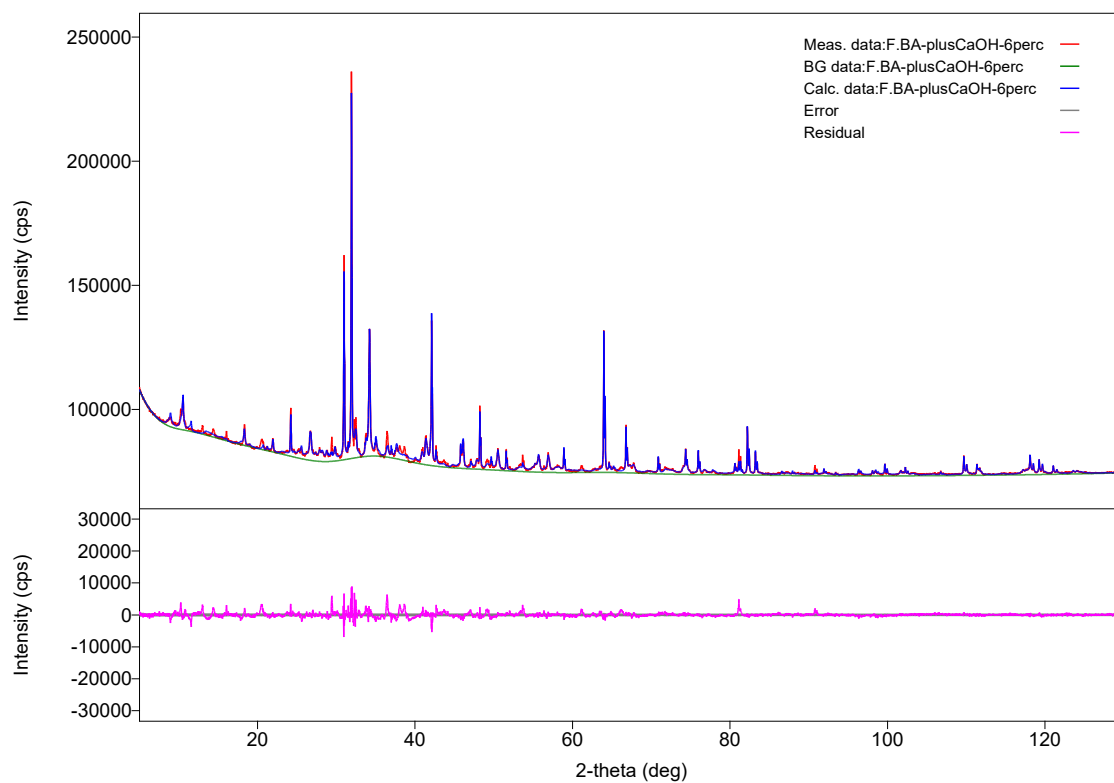
Analysis date	2021/06/10 10:33:19		
Sample name	F.BA-plusCaOH-6perc	Measurement date	2021/05/27 13:44:22
File name	F.BA-plusCaOH-6perc.ras	Operator	administrator
Comment			

### Qualitative analysis results

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Rutile, syn	Ti O <sub>2</sub>	0.303	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-005-4625
Calcium Carbonate	Ca ( C O <sub>3</sub> )	0.886	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-023-8700
Ettringite	Ca <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> ( S O <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ( O H ) <sub>12</sub> ( H <sub>2</sub> O ) <sub>24</sub>	1.253	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-022-3982
a-Si O <sub>2</sub> , quartz, syn	Si O <sub>2</sub>	0.954	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-005-4718
Albite/anorthite high	Na <sub>0.793</sub> Ca <sub>0.207</sub> Al <sub>1.21</sub> Si <sub>2.79</sub> O <sub>8</sub>	1.491	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-024-2150
magnesioferrite, syn	Mg Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1.290	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-012-1069
Yavapaiite, syn	K Fe ( S O <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	1.515	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-001-8281
Tobermorite	Ca <sub>2.25</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>7.5</sub> ( O H ) <sub>1.5</sub> ( H <sub>2</sub> O )	1.378	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-014-8455
Fedotovite	K <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> ( S O <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> O	1.549	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-012-5395

### Weight ratio

	Phase name	Content(%)
-	Rutile, syn	10.0(2)
-	Calcium Carbonate	7.83(18)
-	Ettringite	6.05(19)
-	a-Si O <sub>2</sub> , quartz, syn	4.88(11)
-	Albite/anorthite high	10.3(4)
-	magnesioferrite, syn	1.62(7)
-	Yavapaiite, syn	3.3(8)
-	Tobermorite	2.30(13)
-	Fedotovite	0.92(9)
-	Unknown	52.8(10)

**Measurement profile**

## Quantitative Analysis Results (WPPF)

### General information

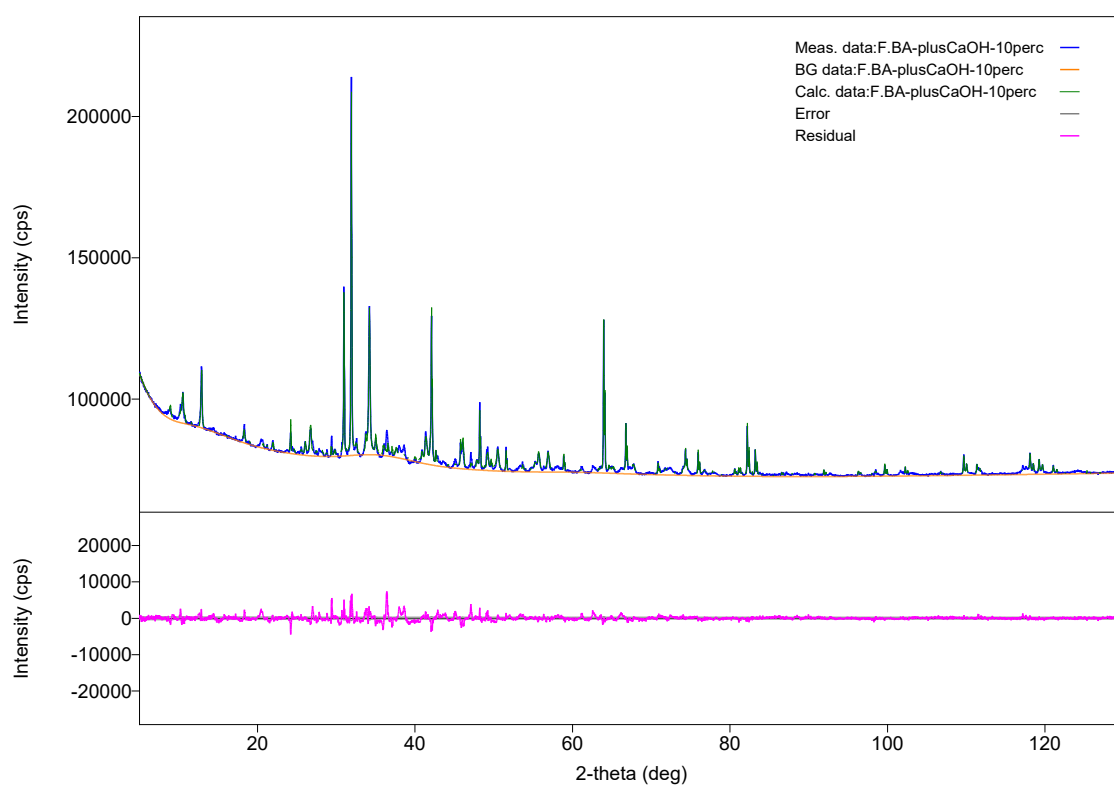
Analysis date	2021/06/10 10:58:47	Measurement date	2021/05/27 10:47:18
Sample name	F.BA-plusCaOH-10perc	Operator	administrator
File name	F.BA-plusCaOH-10perc.ras		
Comment			

### Qualitative analysis results

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Albite/anorthite high	Na <sub>0.793</sub> Ca <sub>0.207</sub> Al <sub>1.21</sub> Si <sub>2.79</sub> O <sub>8</sub>	1.734	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-024-2150
Tobermorite	Ca <sub>2.25</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>7.5</sub> (OH) <sub>1.5</sub> (H <sub>2</sub> O)	1.486	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-014-8455
Fedotovite	K <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> O	2.101	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-012-5395
calcium hydridodeuterioaluminate sulfate(VI) deuteriohydrate *, ettringite, dehydrated, syn	Ca <sub>6</sub> (Al (O (D <sub>0.962</sub> H <sub>0.038</sub> ) <sub>6</sub> ) <sub>2</sub> (S O <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ( (D <sub>0.962</sub> H <sub>0.038</sub> ) <sub>2</sub> O ) <sub>25.5</sub>	1.062	ICDD (PDF-4+ 2021)	01-074-9855
Hydrocalumite	Ca <sub>8</sub> Al <sub>4</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>24</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>9.6</sub>	1.065	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-014-9938
Rutile, syn	TiO <sub>2</sub>	0.299	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-005-4625
Calcium Carbonate	Ca (CO <sub>3</sub> )	0.827	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-023-8700
α-SiO <sub>2</sub> , quartz, syn	SiO <sub>2</sub>	0.836	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-005-4718
Magnesium Oxide Iron	Mg Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1.289	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-012-0909
Wüstite, syn	Fe <sub>0.95</sub> O	1.315	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-002-8162

**Weight ratio**

	Phase name	Content(%)
-	Albite/anorthite high	2.3(3)
-	Tobermorite	1.94(10)
-	Fedotovite	1.6(2)
-	calcium	3.68(19)
-	Hydrocalumite	3.00(11)
-	Rutile, syn	10.00(13)
-	Calcium Carbonate	8.46(14)
-	a-Si O <sub>2</sub> , quartz, syn	3.59(7)
-	Magnesium Iron Oxide	1.75(6)
-	Wüstite, syn	0.56(3)
-	Unknown	63.2(5)

**Measurement profile**

Liite 13. XRD-tulokset koekappaleelle 6 % sementin lisäyksellä.

## Quantitative Analysis Results (WPPF)

### General information

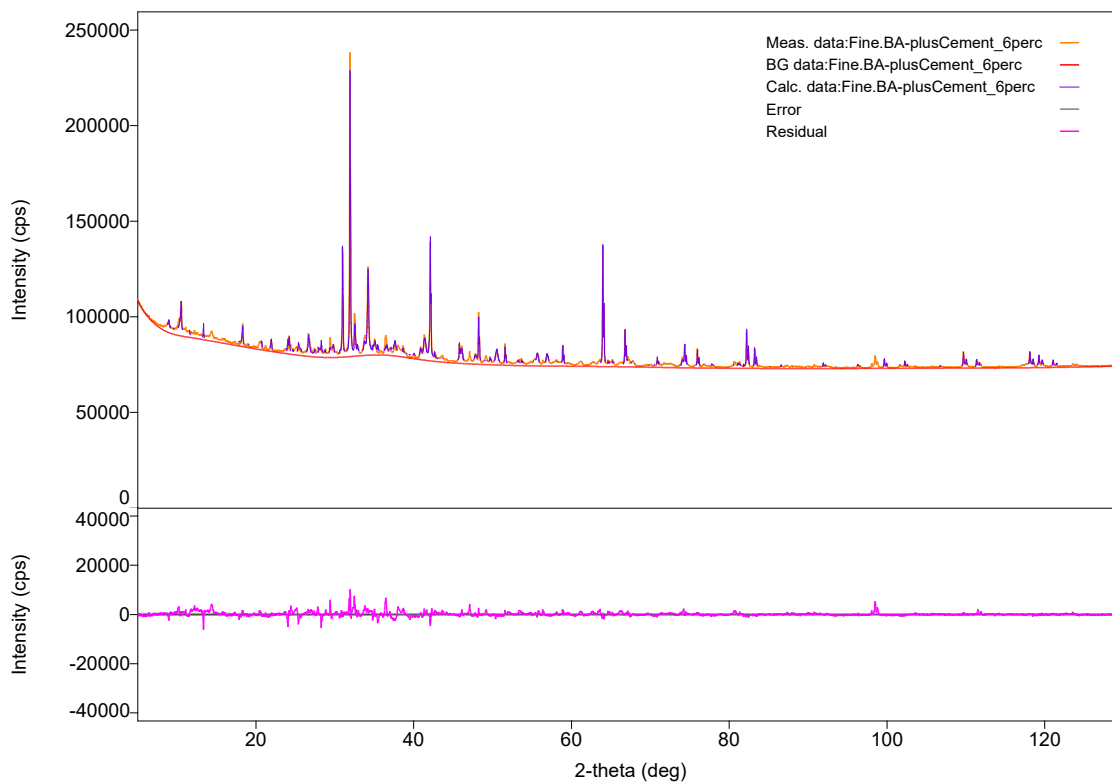
Analysis date	2021/06/10 11:19:32	Measurement date	2021/05/27 12:06:14
Sample name	Fine.BA-plusCement_6perc	Operator	administrator
File name	Fine.BA-plusCement_6perc.ras		
Comment			

### Qualitative analysis results

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Albite/anorthite high	Na <sub>0.793</sub> Ca <sub>0.207</sub> Al <sub>1.21</sub> Si <sub>2.79</sub> O <sub>8</sub>	1.914	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-024-2150
Tobermorite	Ca <sub>2.25</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>7.5</sub> (OH) <sub>1.5</sub> (H <sub>2</sub> O)	1.962	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-014-8455
Fedotovite	K <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> O	3.106	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-012-5395
calcium hydridodeuterioaluminate sulfate(VI) deuteriohydrate *, ettringite, dehydrated, syn	Ca <sub>6</sub> (Al (O <sub>0.962</sub> H <sub>0.038</sub> ) <sub>6</sub> ) <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (O <sub>0.962</sub> H <sub>0.038</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>25.5</sub>	1.597	ICDD (PDF-4+ 2021)	01-074-9855
Hydrocalumite	Ca <sub>8</sub> Al <sub>4</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>24</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>9.6</sub>	3.116	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-014-9938
Magnetite, bearing	Ti-Fe (Fe <sub>1.04</sub> Ti <sub>0.67</sub> ) O <sub>4</sub>	3.395	ICDD (PDF-4+ 2021)	01-071-6448
Gypsum, syn	Ca (SO <sub>4</sub> ) (H <sub>2</sub> O) <sub>2</sub>	2.975	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-008-9805
magnetite, syn	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	1.530	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-018-0091
karrooite, syn	Mg Ti <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3.017	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-014-4767
Rutile, syn	Ti O <sub>2</sub>	0.676	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-005-4625
Calcium Carbonate	Ca (CO <sub>3</sub> )	1.301	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-023-8700
Quartz, syn	Si O <sub>2</sub>	1.393	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-007-1808

**Weight ratio**

	Phase name	Content(%)
-	Albite/anorthite high	4.74126428774603(-
-	Tobermorite	1.49837584195160(-
-	Fedotovite	5.47325630806627(-
-	calcium	4.75302707769828(-
-	Hydrocalumite	0.00602601523108(-
-	Magnetite, Ti-bearing	0.19539919943780(-
-	Gypsum, syn	0.82568905537842(-
-	magnetite, syn	1.80687323017898(-
-	karrooite, syn	2.16873819562027(-
-	Rutile, syn	10.00000000000000(-
-	Calcium Carbonate	5.89544421385724(-
-	Quartz, syn	2.84985853770070(-
-	Unknown	59.78604803713332(-

**Measurement profile**

Liite 14. XRD-tulokset koekappaleelle 10 % sementin lisäyksellä.

## Quantitative Analysis Results (WPPF)

### General information

Analysis date 2021/06/10 11:15:04  
 Sample name F.BA-plusCement\_10perc Measurement date 2021/05/27 13:07:15  
 File name F.BA-plusCement\_10perc.ras Operator administrator  
 Comment

### Qualitative analysis results

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Albite/anorthite high	Na <sub>0.793</sub> Ca <sub>0.207</sub> Al <sub>1.21</sub> Si <sub>2.79</sub> O <sub>8</sub>	2.039	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-024-2150
Tobermorite	Ca <sub>2.25</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>7.5</sub> (OH) <sub>1.5</sub> (H <sub>2</sub> O)	1.809	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-014-8455
Fedotovite	K <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> O	1.846	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-012-5395
calcium hydridodeuterioaluminate sulfate(VI) deuteriohydrate *, ettringite, dehydrated, syn	Ca <sub>6</sub> (Al (O (D <sub>0.962</sub> H <sub>0.038</sub> ) <sub>6</sub> ) <sub>2</sub> (S O <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ( (D <sub>0.962</sub> H <sub>0.038</sub> ) <sub>2</sub> O ) <sub>25.5</sub>	1.227	ICDD (PDF-4+ 2021)	01-074-9855
Hydrocalumite	Ca <sub>8</sub> Al <sub>4</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>24</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>9.6</sub>	1.651	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-014-9938
Magnetite, bearing	Ti-Fe (Fe <sub>1.04</sub> Ti <sub>0.67</sub> ) O <sub>4</sub>	2.602	ICDD (PDF-4+ 2021)	01-071-6448
Gypsum, syn	Ca (SO <sub>4</sub> ) (H <sub>2</sub> O) <sub>2</sub>	3.042	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-008-9805
magnetite, syn	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	1.443	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-018-0091
karrooite, syn	Mg Ti <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.470	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-014-4767
Rutile, syn	Ti O <sub>2</sub>	0.373	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-005-4625
Calcium Carbonate	Ca (CO <sub>3</sub> )	0.813	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-023-8700
Quartz, syn	Si O <sub>2</sub>	1.411	ICDD (PDF-4+ 2021)	04-007-1808

**Weight ratio**

	Phase name	Content(%)
-	Albite/anorthite high	0.93527955280074(-
-	Tobermorite	1.14657977426169(-
-	Fedotovite	0.65812182884855(-
-	calcium	7.06568210748435(-
-	Hydrocalumite	0.46450160837894(-
-	Magnetite, Ti-bearing	0.06623647994872(-
-	Gypsum, syn	0.00431217373484(-
-	magnetite, syn	1.62769613792703(-
-	karrooite, syn	1.17393743722371(-
-	Rutile, syn	10.00000000000000(-
-	Calcium Carbonate	5.55640734207492(-
-	Quartz, syn	3.43746209752850(-
-	Unknown	67.86378345978801(-

**Measurement profile**